

Joni Koivu

**UREASUUTTIMIEN OPTIMAALISTEN KORKEUSASEMIEN
MÄÄRITYS K3-KATTILAAN**

UREASUUTTIMIEN OPTIMAALISTEN KORKEUSASEMIEN MÄÄRITYS K3-KATTILAAN

Joni Koivu
Opinnäytetyö
Kevät 2015
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka, energiatekniikka

Tekijä: Joni Koivu

Opinnäytetyön nimi: Ureasuuttimien optimaalisten korkeusasemien määrittäminen K3-kattilaan

Työn ohjaajat: Reijo Hukkanen, Ilkka Laakso, Jukka Ylikunnari

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2015

Sivumäärä: 50 + 8 liitettä

Stora Enso Oyj:n Oulun tehtailla pyritään vähentämään NO_x-päästöjä 1/2016 kiristyvien päästörajoitusten takia. Tuleva päästöraja typpioksidipäästöille tulee olemaan leijupetikattila K3:lla 250 mg/Nm³ ja tällä hetkellä päästöt ovat 400 - 450 mg/Nm³ riippuen kattilan höyrykuormasta ja turpeen osuudesta polttoaineseoksessa.

K3-kattilalle tehtiin lämpöprofilointi, jossa mitattiin tulipesän lämpötiloja ennalta päätetyistä kattilan mittauspisteistä eri höyrykuormilla ja polttoainejakaumilla. Urea reagoi tehokkaimmin 850 - 1 000 °C:n lämpötilassa, joten kattilan eri tasojen lämpötilojen tietäminen on välttämätöntä optimaalisen suutintason määrittämiseksi. Kattilalle tehtiin Valmet Oyj:n tekemänä tammikuussa 2015 urean koeajot, jossa saatiin todellisia tuloksia SNCR-järjestelmän toimivuudesta K3-kattilassa. Koeajoista saatiin tarkkaa tietoa typpioksidien reduktioista ja ammoniakkin raakapäästöistä eri ureansyötyillä. Lämpöprofiloinnin ja urean koeajoista saamien tietojen perusteella voitiin päätellä optimaalisimmat urean syöttökorkeudet tulipesään.

Lämpöprofiloinnin ja urean koeajojen perusteella selvisi, että K3-kattilaan tarvitaan neljä syöttötasoa, koska kattilan höyrykuormat vaihtelevat paljon. Lisäksi NO_x-päästöjen lähtöarvo oli niin korkea, että tarvitaan maksimaalinen reduktio vaihteleville höyrykuormille, jotta pysytään tulevilla päästörajoituksissa. Kuormien vaihdellessa optimaalisen lämpötilaikkunan korkeus vaihtelee tulipesässä urean syötölle. Neljän ureansyöttötason lisäksi on mahdollista, että päästöjä voidaan joutua vielä vähentämään turpeen osuutta vähentämällä polttoaineseoksessa, koska turpeen typpipitoisuus on huomattavasti suurempi kuin kuoren. Kattilassa on mahdollista saada tarpeellinen NO_x-päästöjen vähennys myös kolmella syöttötasolla, mutta se vaatisi alle 40 kg/s höyrykuormalla ilmasuhteiden muuttamista.

Asiasanat: SNCR, leijupetikattila, NO_x, typpioksidi, urea

SISÄLLYS

| | |
|---|----|
| TIIVISTELMÄ | 3 |
| SISÄLLYS | 4 |
| 1 JOHDANTO | 6 |
| 2 HÖYRYKATTILA | 7 |
| 2.1 Stora Enson voimalaitos | 7 |
| 2.2 Höyryvoimalaitos | 8 |
| 2.2.1 Voimalaitoksen osat | 9 |
| 2.2.2 Teollisuuden vastapainevoimalaitos | 13 |
| 2.2.3 Luonnonkiertokattilat | 15 |
| 2.2.4 Leijukerrospoltto | 18 |
| 2.3 Polttoaineet | 19 |
| 2.3.1 Turve | 20 |
| 2.3.2 Kuori | 21 |
| 2.4 Päästöt | 21 |
| 2.4.1 Typenoksidit | 22 |
| 2.4.2 Päästöjen vähentäminen | 23 |
| 2.4.3 Uudet päästörajat | 24 |
| 2.5 SNCR | 26 |
| 3 LÄMPÖTILOJEN MITTAAMINEN JA MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI | 28 |
| 3.1 Kattilan lämpöprofilointi | 28 |
| 3.2 Urean koeajot | 31 |
| 3.3 Lämpötilakäyrien analysointi | 35 |
| 3.3.1 Höyrykuorma alle 40 kg/s (liite 2) | 36 |
| 3.3.2 Höyrykuorma 40 - 50 kg/s (liite 3) | 37 |
| 3.3.3 Höyrykuorma 50 - 60 kg/s (liite 4) | 39 |
| 3.3.4 Höyrykuorma 60 - 70 kg/s (liite 5) | 41 |
| 3.3.5 Höyrykuorma yli 70 kg/s (liite 6) | 42 |
| 3.4 Optimaalisten suutintojen määrittäminen | 43 |
| 3.4.1 Höyryn tuotto alle 40 kg/s (liite 8) | 44 |
| 3.4.2 Höyryn tuotto 40 - 50 kg/s (liite 8) | 44 |
| 3.4.3 Höyryn tuotto 50 - 60 kg/s (liite 8) | 44 |

| | |
|---|----|
| 3.4.4 Höyryn tuotto 60 - 70 kg/s | 45 |
| 3.4.5 Höyryn tuotto yli 70 kg/s (liite 8) | 45 |
| 4 YHTEENVETO | 46 |
| LÄHTEET | 48 |
| LIITTEET | 50 |

1 JOHDANTO

Työ on tehty Stora Enson voimalaitokselle Ouluun. Työn kohteena on leijupeti-kattila K3, joka tuottaa höyryä tehtaan prosesseihin sekä sähkön ja kaukolämmön tuotantoon.

Kattila ei täytä 1/2016 voimaan astuvia typpioksidin päästörajoja. Uudet päästöraajat yritetään saavuttaa uudella SNCR-laitteistolla, jossa tulipesään ruiskutetaan ureavesiliuosta. Urea reagoi savukaasuissa olevien typpioksidien kanssa muodostaen puhdasta typpeä ja vettä.

Urea reagoi savukaasuissa olevien typpioksidien kanssa tehokkaimmin 850 - 1 000 °C:sen lämpötilassa. Työn tavoitteena on löytää optimaaliset korkeus-asetukset ureasuuttimille K3-kattilaan tulipesän lämpötilamittauksin ja niistä piirrettyjen lämpötilakäyrien avulla. Lisäksi lämpöprofiloinnista saatuja lämpötilakäyriä tulee analysoida ilmasuhteiden, kiertokaasun, polttoainejakauman ja höyrykuorman perusteella. (Liite 1.)

2 HÖYRYKATTILA

2.1 Stora Enson voimalaitos

Stora Enson Oulun tehtaiden voimalaitos koostuu neljästä kattilasta, joita ovat 202 MW:n soodakattila, 246 MW:n leijupetikattila (K3), 142 MW:n puukattila ja 55 MW:n öljykattila. Puu- ja öljykattilaa käytetään apukattiloina. Kattiloiden tuottamaa höyryä käyttävät Stora Enso Oulun sellu- ja paperitehtaat, Akzo Nobel Pulp and Performance Chemicals Oy, Eka Synthomer Oy, Arizona Chemical Oy, Efora Oy ja Oulun energia. (1.)

Höyrystä 63 % tuotetaan soodakattilalla, leijupetikattilalla 36 % ja apukattiloilla 1 %. Tuotetusta höyrystä 20 % käytetään sähkön kehitykseen, sellutehtaan käyttöön 38 %, paperitehtaan käyttöön 32 %, lämmön myyntiin 5 % ja tehdaspalveluihin sekä omaan käyttöön 5 %. (1.)

Voimalaitos tuottaa vuosittain 0,5 TWh, joka vastaa 43 % koko saaren tarvitsemasta sähköenergiasta. Sähköä ostetaan 0,35 TWh, joka vastaa 30 % saaren sähköenergiasta. Paperitehtaan sähkön kulutus on noin 50 % saaren sähkön tarpeesta, joka on hieman alle 0,6 TWh. Sellutehtaan osuus on 20 %, joka on reilu 0,2 TWh. (1.)

K3-kattila on otettu käyttöön vuonna 1997. Sen höyryteho on 246 MW ja höyryarvot 90 bar ja 525 °C. Kuori ja turve polttoaineseoksella höyryntuotto maksimissaan on 95 kg/s. (1.)

Soodakattila on otettu käyttöön vuonna 1988. Sen höyryteho on 202 MW ja höyryarvot 82 bar ja 480 °C. (1.)

Sähkön tuotannossa on käytössä turbogeneraattori 5 ja 6. Turbogeneraattori on AEG Kanisin valmistama väliotto-vastapaineturbiini, joka se on otettu käyttöön vuonna 1987. Turbiinin nimellisteho on 68,7 MW ja generaattorin sähköteho 61,5 MW. (1.)

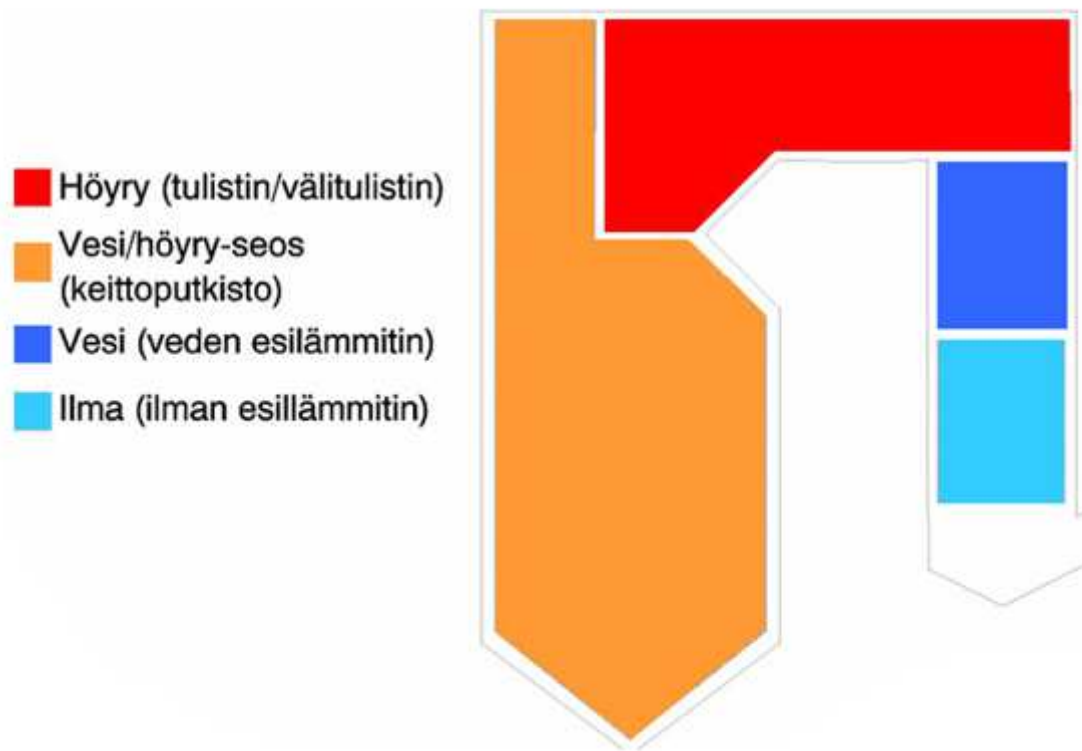
Turbogeneraattori 6 on Siemensin valmistama väliotto-vastapaineturbiini, joka on otettu käyttöön vuonna 1996. Turbiinin nimellisteho ja generaattorin sähköteho ovat 77 MW. (1.)

2.2 Höyryvoimalaitos

Höyrykattilan päätarkoituksena on muuttaa sinne pumpattu vesi tulistetuksi höyryksi. Veden muuttaminen höyryksi tapahtuu kattilan ekonomaisierissa, höyrystinputkissa ja tulistimissa. (2, s. 7.)

Tavallisesti höyrykattilassa veden paine on 150 - 220 bar ja lämpötila 450 - 550 °C. Veden höyrystämiseen tarvitaan energiaa, joka tuotetaan höyrykattiloissa fossiilisen tai biopolttoaineen palamisella. Jotta palaminen on täydellistä, kattilaan puhallettu ilmamäärä on tarkoin mitoitettu, koska palaminen ei ole mahdollista ilman happea. (2, s. 7.)

Polttoaineen palaessa siitä vapautuu kemiallista energiaa lämpöenergiaksi savukaasuihin, joita hyödynnetään veden höyrystämisessä. Palamisilman esilämmitin, ekonomaiseri, höyrystin ja tulistin toimivat lämmönsiirtiminä, joissa savukaasuissa oleva lämpöenergia siirtyy veteen, höyryyn tai palamisilmaan (kuva 1). (2, s. 7.)



KUVA 1. Lämpöpintojen sijoittuminen kattilaan (3)

2.2.1 Voimalaitoksen osat

Syöttövesipumppu

Syöttövesipumpun tarkoituksena on pumpata vesi syöttövesisäiliöstä kattilaan. Pumput ovat rakenteeltaan suuria, koska niiden tulee kestää korkeita paineita ja lämpötiloja. Paine voi olla suurimmillaan 300 bar ja lämpötila 100 - 200 °C. (2, s. 225 - 227.)

Yleinen ratkaisu voimalaitoksissa on kolmen pumpun yhteiskäyttö, jossa pumput toimivat 50 % teholla. Käyttövoima pumpuille tulee sähkömoottorilta tai mahdollisesti voimalaitoksen turbiinilta (4, s. 136; 2, s. 225 - 227.)

Rakenteeltaan syöttövesipumput ovat monivaiheisia keskipakopumppuja. Pumppu imee vettä syöttövesisäiliöstä juoksupyörään, jossa akselin pyörimisliike antaa vedelle kehän tangentin suuntaisen nopeuskomponentin ja keskipakovoiman aiheuttaman paineen lisäyksen (4, s. 136). Jotta paine saadaan pumpulla kattilapaineen tasolle, tulee pumpussa vaiheita olla useampi sarjaan kytkettynä. (2, s. 225 - 227.)

Syöttöveden esilämmitin (ekonomaiserin)

Ekonomaiserilla eli veden esilämmittimellä on tarkoituksena esilämmittää vesi ennen keittoputkistoon menemistä. Ekonomaiserit jaetaan höyrystäviin ja höyrystymättömiin. Höyrystämättömissä veden ulostulo lämpötila pidetään 20 °C höyrystymislämpötilan alapuolella, jotta höyrystyminen estettäisiin kaikissa mahdollisissa olosuhteissa. Höyrystävissä vesi saavuttaa höyrystymislämpötilan ja osa vedestä höyrystyy jo ekonomaiserin lämmönsiirtoputkistoissa. (2, s. 194 - 196.)

Ekonomaiserilla parannetaan kattilan hyötysuhdetta. Koska tulistimien jälkeen savukaasuissa on vielä paljon lämpöenergiaa, käytetään se hyväksi syöttöveden lämmittämisessä. Savukaasujen lämpötila vaihtelee tulistimien jälkeen 600 ja 800 °C:n välillä ja ekonomaiserin jälkeen savukaasujen lämpötila on 250 - 450 °C. Suuremmissa voimalaitoksissa parannetaan kattilanhöytysuhdetta lämmittämällä syöttövettä myös väliottohöyryllä. (2, s. 194 - 196.)

Lämmönsiirtimissä on usein rivoitukset lämmönsiirtimien kaasupuolella, koska kaasun lämmönsiirto-ominaisuudet ovat huonommat kuin vedellä. Rivoituksella saadaan kaasupuolen lämmönsiirtopinta-alaa suuremmaksi. Rivalliset lämmönsiirtoputket ovat kuitenkin vaikeampia nuohota ja aiheuttavat savukaasuissa painehäviöitä. Jos poltossa syntyy paljon lentotuhkaa, käytetään yleensä sileitä lämmönsiirtoputkia rivallisten sijaan, koska ripoihin jää paljon savukaasujen mukana tulevaa lentotuhkaa aiheuttaen lämmönsiirto-ongelmia. (2, s. 194 - 196.)

Ekonomaiserin materiaalina käytetään yleisesti valurautaa tai terästä. Vaatimuksia materiaalille ovat hyvä lämmönsiirtokyky sekä helppo muokattavuus ja hitsattavuus. (2, s. 194 - 196.)

Valurautaisia lämmönsiirtimiä käytetään, kun syöttövesi ekonomaiseriin on kylmää, koska se kestää paremmin matalalämpötilasyöpymistä. Savukaasujen hiukkaspitoisuuden ollessa korkeampi se kestää nuohoimien aiheuttaman rasituksen. Valurauta ei kuitenkaan sovellu korkeampiin paineisiin. Teräsputket ovat yleisempiä, kun savukaasun syövytysominaisuudet ovat alhaisemmat. (2, s. 194 - 196)

Ilmanesilämmitin (luvo)

Luvon tarkoituksena on nopeuttaa ja tehostaa polttoaineen palamista tulipesässä. Palamisilma puhalletaan kattilaan 100 - 400 °C:n lämpötilassa riippuen polttoaineesta ja polttotavasta. Tällöin saadaan mahdollisimman tasainen palamisreaktio tulipesään. (2, s. 196 - 201.)

Happokastepiste asettaa luvolle vaatimuksia, koska se on viimeinen lämmönsiirrin kattilassa. Savukaasun lämpötila ei saa alittaa happokastepistettä, jotta vältetään ilmanesilämmittimen lämpöpintojen syöpymiseltä (2, s. 100). (2, s. 196 - 201.)

Luvot jaetaan rekuperatiivisiin ja regeneratiivisiin esilämmittäjiin, joissa lämpö siirtyy savukaasuista palamisilmaan. Lisäksi käytetään höyryluvoja, joissa lämmönlähteenä on välipaine- tai matalapainehöyry. Rekuperatiivisissa lämmönsiirtimissä lämpö siirtyy lämmönsiirrinpinnan välityksellä savukaasuista ilmaan. Regeneratiivisissa lämmönsiirtimissä lämpö siirretään varaavaan materiaaliin, johon ilma ja savukaasut ovat vuorotellen kosketuksissa. Höyryluvoja käytetään ennen savukaasulämmitteistä ilmanesilämmitintä, jos savukaasun lämpötila laskee alle happokastepisteen. (2, s. 196 - 201.)

Lieriö

Tärkeä osa luonnonkiertokattiloita on lieriö, jossa kylläinen höyry erotetaan kyläisestä vedestä. Lieriöltä höyry ohjataan tulistimille ja vesi keittoputkistoon. Erotus tulee tapahtua selkeästi, koska veden sisältämien suolojen joutuminen tulistimiin aiheuttaa kerrostumia putkistojen sisäosiin ja mahdollisesti turbiiniin. Höyry-vesiseos tuodaan tasaisesti lieriöön, koska erotus tapahtuu tiheyserojen avulla. Tällöin höyry-vesiseoksen erottuminen onnistuu parhaiten. (2, s. 117 - 118.)

Lieriössä kattilavedestä erottuu syöttöveden mukana tulleet epäpuhtaudet. Lieriöstä puhalletaan pois osa vedestä, jonka mukana epäpuhtaudet poistuvat höyryputkistoista. Tämän tilalle lieriöön pumpataan syöttövettä tarvittava määrä. Epäpuhtaudet aiheuttavat kattilakiveä, joka huonontaa kattilan lämmönsiirt ominaisuuksia putkistoissa. Ulospuhalluksen määrä riippuu syöttöveden, lauhteen ja kattilaveden suolapitoisuuksista. (2, s. 114.)

Höyrystin

Höyrystimessä syöttöveden esilämmittimeltä tuleva vesi höyrystetään. Höyrystinputkisto ympäröi tulipesää, jossa lämmönsiirtyminen tapahtuu säteilemällä. Vesi-höyryseoksella on höyrystymisen ohella tehtävänä jäähdyttää höyrystinputkistoa, jotta välttyttäisiin putkien ylikuumenemisilla ja vaurioilta. (2, s. 186 - 188.)

Putkimateriaalina käytetään yleensä normaalia hiiliterästä. Jos palaminen aiheuttaa syöpymistä putkissa, voidaan käyttää päällysteenä tulenkestävää massaa. Uusissa kattiloissa käytetään höyrystinputkistona kaasutiivistä putkiseinämää (kuva 2). (2, s. 186 - 188.)



KUVA 2. Nykyään yleisesti käytetty kaasutiivis seinärakenne, jossa höyrystinputkisto (3)

Tulistin

Tulistimissa lieriöltä tuleva kuiva höyry tulistetaan noin 550 °C:seen. Tätä korkeampia lämpötiloja tulistinmateriaalit eivät kunnolla kestä. Välitulistamisella tarkoitetaan höyryn uudelleen tulistamista, jossa höyry turbiinissa paisumisen jälkeen tulee tulistimille takaisin uudelleen tulistumaan. Tällä tavoin saadaan sähköntuotantoa parannettua, koska alemmpipaineista höyryä tulistamalla sitä voidaan paisuttaa turbiinissa pidempään. (2, s. 189 - 192.)

Tulistetun höyryn lämpötila pyritään pitämään tasaisena, koska höyryn lämpötilan noustessa tulistinputket ylikuumenevat ja toisaalta lämpötilan laskiessa säh-

köntuotanto heikkenee. Höyryn tulee virrata putkissa nopeasti, koska lämmönsiirto-ominaisuudet ovat heikkommat savukaasuista höyryyn, jolloin tulistinputkien kuumentuminen on vaarana. Höyryn nopeus putkissa on 10 - 40 m/s riippuen höyrynpaineesta, joka vaikuttaa höyryn lämmönsiirto-ominaisuuksiin. (2, s. 189 - 192.)

Tulistimet jaetaan säteily-, verho-, konvektio- ja yhdistelmä tulistimiin. Tulistimilla on eri lämmönsiirtotavat ja eri tarkoitukset, minkä takia ne sijoittuvat eri osiin kattilaa. (2, s. 189 - 192.)

Säteilytulistin on tulipesän päällä, jolloin lämpö siirtyy säteilemällä. Säteily on tehokas lämmönsiirtotapa. Tällöin höyryn nopeus tulee olla korkea, jotta putket jäähtyvät tarpeeksi. (2, s. 189 - 192.)

Verhotulistimet sijaitsevat tulipesän päällä ennen konvektiotulistimia. Verhotulistimet lämmönsiirron ohella estävät epäpuhtauksien pääsyn varsinaisille konvektiotulistimille, mikä heikentäisi konvektiotulistimien lämmönsiirto-ominaisuuksia sulan tuhkan kiinnittyessä niihin. Verhotulistimia käytetään polttaessa likaavia polttoaineita, joita ovat esimerkiksi hiili, turve ja erilaiset jäteliemet. (2, s. 189 - 192.)

Konvektiotulistimet sijaitsevat tulipesän jälkeen, jossa lämpö siirtyy konvektiolla höyryyn virtaavasta savukaasusta. Konvektiotulistimia on pysty- ja vaakamallisia. (2, s. 189 - 192.)

Yhdistelmätulistimissa lämmönsiirto tapahtuu konvektiolla ja säteilemällä. Osa putkistosta on kosketuksissa savukaasujen kanssa, jolloin lämpö siirtyy konvektiolla ja osaan putkistoa lämpö siirtyy säteilemällä. (2, s. 189 - 192.)

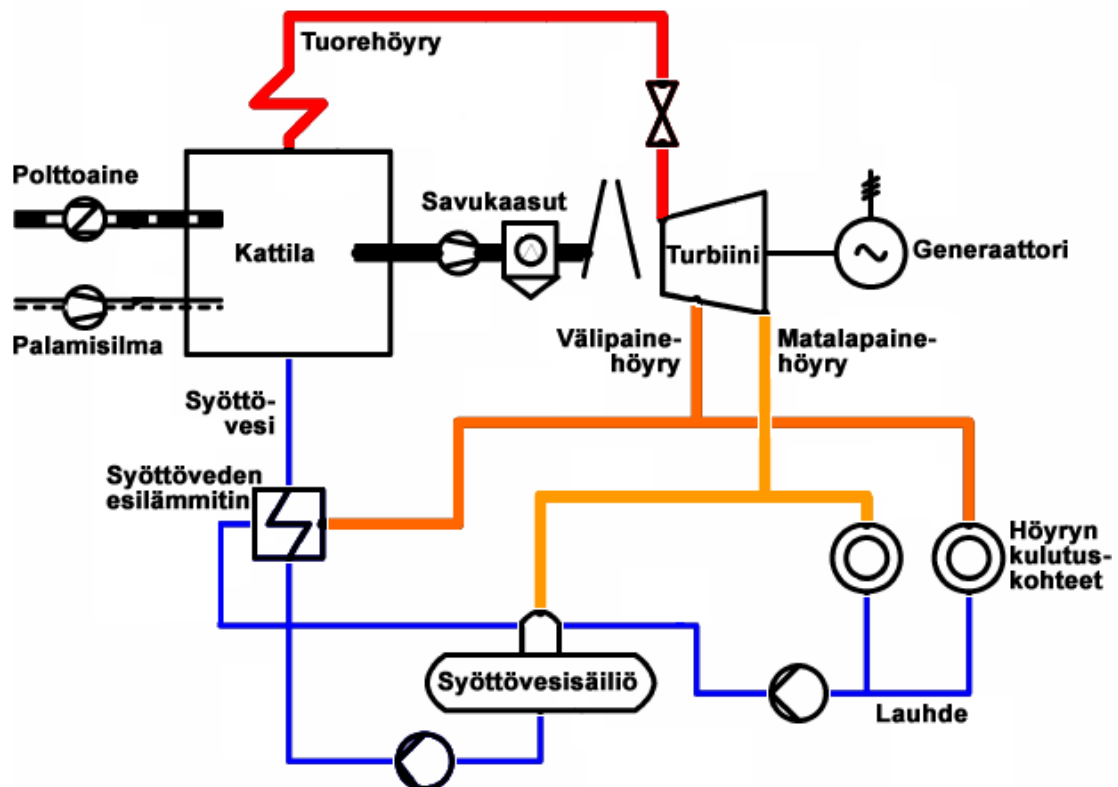
2.2.2 Teollisuuden vastapainevoimalaitos

Teollisuudessa tarvitaan suuria määriä lämpöenergiaa, jonka siirrossa käytetään yleisesti höyryä, koska sitä on helppo siirtää putkistoja pitkin. Siihen saadaan sitoutumaan isoja määriä lämpöenergiaa ja sen lämmönsiirto-ominaisuudet ovat hyvät. Lämpöä siirrettäessä höyryn tulee olla kylläistä höyryä, koska lauhtuvan höyryn lämmönsiirtokerroin on suurempi kuin tulistetulla

höyryllä. Tästä syystä turbiinista tulevaan matalapainehöyryynkin ruiskutetaan vettä tulistumisen poistamiseksi (4, s. 64). (2, s. 12 - 13.)

Haluttaessa tuottaa sähköä teollisuuden voimalaitoksessa kattilan painetasoa tulee olla tarpeeksi korkea ja hankkia turbiinilaitos, jossa höyryn paisunnalla saadaan tuotettua sähköenergiaa. Tämä on hyödyllistä teollisuudessa, koska suuret tehtaat ovat lähes ympäri vuoden käynnissä lukuun ottamatta yhtä tai kahta seisokkia. (2, s. 12 - 13.)

Kattilan tulistimilta tuleva höyry ohjataan turbiiniin, jossa se paisunnalla saa turbiinin akselin pyörimään osuessaan juoksusiivistöön. Turbiinin kanssa samalla akselilla on sähkögeneraattori, jossa pyörimisenergia muuttuu sähköenergiaksi. Teollisuudessa tarvitaan eripaineisia höyryjä, jonka takia turbiini on varustettu useilla väliottoilla. Väliottojen avulla saadaan eripaineisia höyryjä käyttöön muihin prosesseihin. Väliottoja käyttämällä höyry ei pääse paisumaan turbiinissa matalaan paineeseen asti, jolloin sähköntuotanto vähenee. Sähkö ei ole päätuote teollisuudessa, mutta prosesseille menevät eripaineiset höyryt ovat välttämättömiä tehtaan päätuotteen kannalta. Tästä syystä sähköteho jää alhaisemmaksi kuin esimerkiksi samankokoisessa kaukolämpövoimalaitoksessa, jossa kaikki höyry saa paisua turbiinissa matalaan paineeseen asti. Kaukolämpöverkkoon siirrettävä lämpö voidaan tehdä matalapainehöyryllä eikä eripaineisille höyryille ole käyttöä. (Kuva 3.) (2, s. 12 - 13.)



KUVA 3. Yhdellä väliotolla varustetun vastapainevoimalaitoksen periaatekuva (3)

Teollisuudessa lauhteista vain osa palaa takaisin kattilaan höyrystymään, koska jotkin prosesseista tarvitsevat höyryä suoraan lämmitykseen. Tämän takia teollisuudessa lisäveden ja vedenkäsittelyn tarve on suuri. Lisäksi prosesseista palautuvaa laudetta tarkkaillaan jatkuvasti, jottei kattilaan pääse sieltä tulleita epäpuhtauksia. (2, s. 12 - 13; 4, s. 63 - 65.)

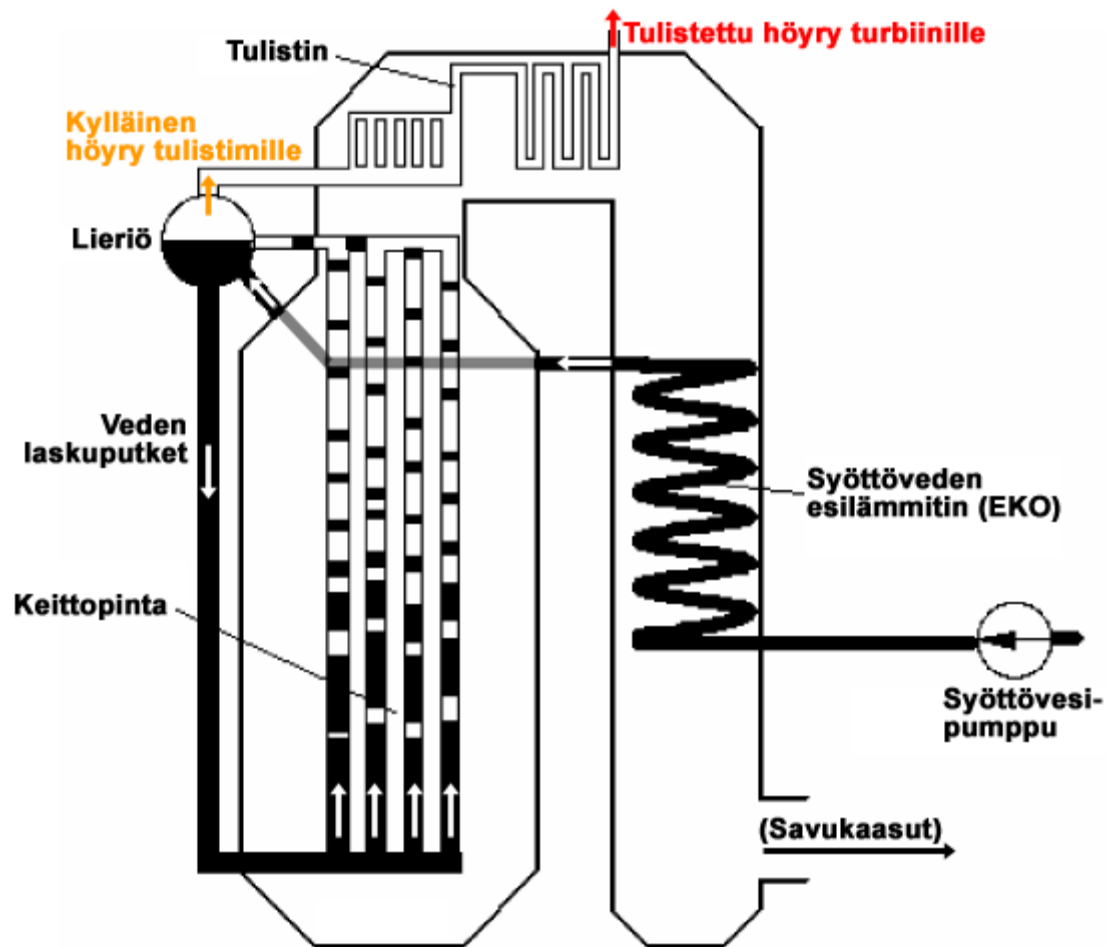
Teollisuudessa kattilat mitoitetaan osaprosessien höyryntarpeen mukaan. Lisäksi voidaan tuottaa sähköä omaan käyttöön tai myyntiin valtakunnanverkkoon. Polttoaineena käytetään yleisesti prosessista syntyviä jätteitä. Esimerkiksi puun jalostuksessa syntyy mustalipeää, puujätettä, lietettä ja kuorta. (2, s. 12 - 13; 4, s. 65.)

2.2.3 Luonnonkiertokattilat

Luonnonkiertokattilat ovat vesiputkikattiloita, joissa vesi höyrystyy tulipesää ympäröivissä keittoputkistoissa. Kattilavesi pumpataan syöttövesisäiliöstä

ekonomaiseriin, jossa loppulämpö savukaasuista hyödynnetään syöttöveden lämmittämisessä ennen lieriöön tuloa. Näin vesi saadaan lähelle höyrystymislämpötilaa vallitsevassa paineessa ja kattilan hyötysuhde paranee. (2, s. 113 - 114.)

Lieriöstä vesi laskeutuu painovoimasta tulipesän pohjan tasalle, josta se jakautuu höyrystinputkiin ympäri kattilaa. Veden lämmitessä ja höyrystyessä sen tiheys laskee, jolloin vesi-höyryseos lähtee nousemaan keittoputkistoa pitkin uuden tiheämmän kylläisen veden tieltä kohti lieriötä. Höyrystinputkissa tiheuseron aiheuttamalla paine-erolla tulee voittaa veden ja vesihöyryn kierrosta aiheutuva painehäviö, joka muodostuu kitka- ja kiihtyvyyssvastuksista. Painehäviö ei saa olla keittoputkistoissa suuri, minkä takia keittoputkistot ovat suoraan ylösmeneviä putkia, joilla on suuret halkaisijat. Lieriössä erottuu höyry ja vesi, minkä jälkeen höyry lähtee tulistimille ja vesi uudestaan keittoputkistoon. (Kuva 4.) (2, s. 113 - 116.)



KUVA 4. Luonnonkiertokattilan periaatekuva (3)

Luonnonkiertokattiloissa puhutaan kiertovoimasta ja kiertoluvuista. Kiertovoimaan vaikuttaa vesihöyryn keskimääräinen tiheys, laskuputkessa olevan kylläisen veden tiheys sekä korkeusero lieriön vesipinnan ja keittoputkiston höyrystymistason välillä. Korkeuseron takia luonnonkiertokattilat ovat yleisesti kapeita ja korkeita. Kiertoluvulla tarkoitetaan höyrystimen vesivirran suhdetta höyrystyvään vesivirtaan. Luonnonkiertokattiloilla suhde on 5 - 100. Korkeapaineisissa vesi-höyrypiireissä kiertoluku on pienempi ja matalapaineisissa korkeampi. (2, s. 114 - 116.)

Luonnonkiertokattiloiden käyttäessä tiheyseroa omakäyttöteho on alhaisempi kuin pakkokierto- tai läpivirtauskattiloilla, joissa vesi pumpataan erillisellä pumpulla höyrystinputkiin. Luonnonkiertokattilat eivät sovellu liian korkeisiin paineisiin, koska veden ja höyryn tiheysero pienenee paineen noustessa. Käytännös-

sä 170 bar on maksimipaine, jossa luonnonkiertokattila toimii. Tällöin vesi on vielä viisi kertaa tiheämpää kuin höyry. (2, s. 113 - 114.)

2.2.4 Leijukerrospoltto

Leijukerroskattiloissa polttoaine palaa tulipesän pohjalla olevan hiekan seassa. Hiekan alta puhalletaan primääri-ilmaa eli leijuilmaa, jolla hiekka saadaan kuplimaan 0,4 - 0,8 m:n paksuisena kerroksena. Eroavaisuus kiertopetikattilaan on puhallusnopeudessa, joka leijukerroskattiloissa on alhaisempi, jolloin hiekkapatjasta voidaan selkeästi erottaa hiekan pinta. Hiekka on raekooltaan 1 - 3 mm ja leijutusnopeus 0,7 - 2 m/s. Primääri-ilma puhalletaan ilmanjakoarinan kautta, joka koostuu teräslevyyn tai jäähdytysputkistoon hitsatuista suuttimista. (2, s. 154 - 159; 4, s. 36 - 37.)

Polttotekniikka soveltuu huonoille ja epätasaisille polttoaineille. Kosteaa polttoainetta sekoitetaan kuumaan hiekkaan, jossa se kuivuu ja syttyy palamaan. Myös eri polttoaineiden käyttö on mahdollista leijukerroskattiloissa hyvällä hyötysuhteella eikä tekniikka vaadi polttoaineelle erikoisempaa käsittelyä. (2, s. 154 - 159; 4, s. 36 - 37.)

Polttoaine syötetään sulkusyöttimillä tulipesän seinämiltä. Pienemmät partikkelit palavat ennen petiä, ja suuremmat, mahdollisesti kosteat partikkelit, sekoittuvat hiekkaan kuivumaan ja palamaan. Jäänöshiili palaa pedissä, ja kaasuuntuvat aineet palavat pedin päällä sekundääri- tai tertiääri-ilmojen korkeudella. (2, s. 154 - 159; 4, s. 36 - 37.)

Tulipesän alaosat ovat muurattu, jolloin estetään eroosion tulipesässä. Tällöin tulipesän alaosissa olevat keittoputkistot eivät pääse ylikuumenemaan. Tämä myös auttaa polttoaineen palamista kuumimmalla vyöhykkeellä. (2, s. 154 - 159; 4, s. 36 - 37.)

Karkeaa petimateriaalia poistetaan pohjatuhkasuppiloiden avulla vesijäähdytteille pohjatuhkaruuville määrääjain. Tällöin otetaan tietty määrä hiekkaa arinan aukosta pois, minkä jälkeen hiekka seulotaan saaden erilleen hiekka ja kuona. Tämän jälkeen hiekka on mahdollista tuoda takaisin tulipesään. (2, s. 154 - 159; 4, s. 36 - 37.)

Leijukerroskattiloissa käytetään alhaista palamislämpötilaa, jolloin saadaan NO_x-päästöjä alhaisemmiksi. Pedin lämpötilaa rajoittaa myös tuhkan sulaminen, joka aiheuttaa hiekan sintraantumisen. Hiekan sintraantuessa kattila tarvitsee yleensä alasajon. Tästä syystä pedin lämpötilaa pidetään 100 °C:ta tuhkan sulamispisteen alapuolella. Pedin lämpötilan noustessa savukaasujen kierrätystä voidaan lisätä tai mahdollisesti ruiskuttaa vettä petiin. (2, s. 154 - 159; 4, s. 36 - 37.)

Palamiseen tarvittava happi tulee pedin alta syötettävän primääri-ilman mukana. Lisäksi happea tulipesään tulee sekundääri- ja tertiääri-ilmana kattilan seinämitä pedin yläpuolella. (2, s. 154 - 159; 4, s. 36 - 37.)

Säätöalue kattiloissa on 100 - 30 %, jossa 100 % on kattilan nimellishöyryn tuotto. Alaraja pedin lämpötilalle on 700 °C ja ylärajan muodostavat pedin lämpötilan lisäksi palamattomien osuuden nousu sekä petimateriaalin karkaaminen savukaasujen mukana. (2, s. 154 - 159; 4, s. 36 - 37.)

2.3 Polttoaineet

Leijupetikattilassa suurin osa lämpöenergiasta tuotetaan turpeen ja kuorimolta tulevan kuoren poltolla. Nämä polttoaineet ovat erilaisia, minkä voi huomata polttoaineanalyysistä alla olevasta taulukosta (taulukko 1). Esimerkiksi työssä tutkittavaan typpioksidien muodostumiseen polttoaineella on suuri vaikutus, koska turpeen typpipitoisuus on huomattavasti suurempi kuin kuoren.

TAULUKKO 1. Polttoturpeen ja kuoren polttoaineanalyysit (6, s. 60.)

| Polttoaine | C | H ₂ | S | N | Cl | Na | K |
|-------------|---------|----------------|------------|-----------|-------------|---------------|-----------|
| Polttoturve | 52 - 56 | 5,0 - 6,5 | 0,05 - 0,3 | 1,0 - 3,0 | 0,02 - 0,06 | 0,007 | 0,02 |
| Kuori | 48 - 52 | 6,2 - 6,8 | <0,05 | 0,3 - 0,5 | 0,01 - 0,05 | 0,007 - 0,020 | 0,1 - 0,5 |

2.3.1 Turve

Turve on hitaasti uusiutuvaa biopolttoainetta. Sen uusiutumisaika on 2 000 - 3 000 vuotta. Turve ei ole fossiilinen polttoaine, mutta sitä käsitellään ilmastopoliitikassa fossiilisena polttoaineena, koska sen poltossa syntyy kasvihuonepäästöjä. Energiapolitiikassa turve lasketaan uusiutumattomiin energialähteisiin sen hitaan uusiutumisen takia. (5.)

Voimalaitoksissa käytetään jyrsin- tai palaturvetta. Suurin energiasisältö on turpeella, joka on pitkään maatonut. Nämä sijaitsevat turvesoiden keski- ja alakeroksissa. Tyypillinen jyrsinturpeen lämpöarvo saapumistilassa voimalaitokselle on noin 10 MJ/kg ja kosteusprosentti 46,5 % (6, s. 57). (5.)

Turve on suurimmalta osalta käytössä sisämaassa sähkön ja lämmön yhteistuotannossa. Lämmitysvoimalaitoksissa turvetta käytetään yleisesti pääpolttoaineena. Turve soveltuu hyvin puupolttoaineen kanssa yhteispolttoon, jossa turvetta käytetään tukipolttoaineena. Turpeen käytöllä tukipolttoaineena voidaan ehkäistä puun saatavuudesta ja laadun vaihteluista aiheutuvia ongelmia. (5.)

EU:n päästökauppa heikentää turpeen kilpailukykyä, koska turpeenpoltossa syntyvien kasvihuonepäästöjen määrä on suuri. Tästä syystä voimalaitokset pyrkivät käyttämään mahdollisimman paljon puupolttoainetta sähkön ja lämmön tuotannossa. (5.)

Turpeen ja puun polttoainesekoitus sopii hyvin leijukerrospolttoon, koska kattilat soveltuvat hyvin polttoaineiden yhteiskäyttöön. Tämä tuo joustavuutta energian tuotantoon ja mahdollistaa puupolttoaineen lisäkäytön tarvittaessa. (5.)

Turve on hyvin saatavaa, laadultaan tasaista ja omaa paremman lämpöarvon kuin puu. Näiden syiden takia turve soveltuu paremmin pääpolttoaineeksi voimalaitoksiin. (5.)

Turpeen poltossa syntyy hiilidioksidia, rikkidioksidia, typen oksideita ja tuhkan mukana tulevia raskasmetalleja. Päästöt ovat pienemmän kuin kivihiilen poltossa, korkeammat kuin puupolttoaineen poltossa. (5.)

2.3.2 Kuori

Kuori on ainespuusta kuorimalla irronnutta tähdettä, jonka mukana on hieman myös ainespuuksi sopivaa puuainesta (7, s. 17). Kuoren osuus kokonaisesta runkopuusta on 10 - 20 %. Korkean ligniinipitoisuuden takia kuoren lämpöarvo on huomattava. Kuorella on korkea kosteus- ja tuhkapitoisuus, joiden takia kuoren poltto-ominaisuudet eivät ole parhaat mahdolliset. Metsäteollisuudessa kuori kuitenkin sopii voimalaitoksen polttoaineeksi, mikä on ratkaisu sen hävittämiseen. (7, s. 65 - 66.)

Kuorta käytetään yleisesti metsäteollisuuden voimalaitoksissa ja lämpölaitoksissa. Kuorta voidaan käsitellä ennen polttamista puristamalla, kuivaamalla tai sekoittamalla muun polttoaineen joukkoon. Kuivaaminen tehdään yleisesti puristimien avulla, mutta myös lämmön avulla kuorta voidaan kuivata. Lämpökuivaus on huomattavasti harvinaisempi. Siinä käytetään hyväksi halpaa jätelämpöä tai savukaasujen lämpöenergiaa. (7, s. 65 - 66.)

2.4 Päästöt

Voimalaitoksien poltossa syntyy päästöjä, joita ovat hiilimonoksidi, hiilidioksidi, hiilivedyt, kiintoaineet, rikkidioksidi ja typpioksideja. Näillä päästöillä on erilaisia vaikutuksia ympäristöön ja ihmisiin, minkä takia viranomaiset tarkastavat laitoksien päästöjä säännöllisesti. Päästöjä voidaan myös vähentää erilaisilla tekniikoilla. (2, s. 91 - 95.)

Häkää eli hiilimonoksidia syntyy epätäydellisessä palamisessa, jossa palaminen tapahtuu alihapella. Hiilen palaessa hiilimonoksidiksi syntyy lämpöhäviöitä verrattuna paloreaktioon, jossa hiili palaa täydellisesti hiilidioksidiksi. Häkäpitoisuutta savukaasuissa saadaan pienennettyä lisäämällä palotilaan happea, jolloin hiili palaa täydellisemmin. Häkää voi kuitenkin syntyä, vaikka reaktioon on puhallettu palamisreaktioon tarvittava happimäärä. Tällöin ongelma on polttoilman ja polttoaineen sekoittumisessa. (2, s. 91 - 95.)

Hiilidioksidi on kasvihuonekaasu typpioksiduulin, metaanin ja vesihöyryn ohella. Kasvihuonekaasut päästävät auringon lämpösäteilyn maan ilmakehään, mutta estävät maan lämpösäteilyn pääsyn pois maan ilmakehästä heijastamalla läm-

pösaiteilyn takaisin maan pinnalle. Tällä on maan lämpenemiseen vaikutus pitkällä aikavälillä. Eri polttoaineet sisältävät eri osuuden hiiltä, josta hiilidioksidia syntyy. Viranomaiset perivät veroa, joka on verrannollinen polttoaineen hiilipitoisuuteen. Tällä on tarkoitus ohjata voimalaitoksia käyttämään vähemmän hiiltä sisältäviä polttoaineita. (2, s. 91 - 95.)

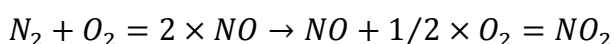
Hiilivedyt ovat palamatonta polttoainetta. Hiilivedyt esiintyvät yleisesti hiilimonoksidin ja kiintoainepäästöjen kanssa, jolloin voidaan epäillä polttoaineen ja ilman sekoittumisen täydellisyyttä. Lisäksi tulipesän alhainen lämpötila voi johtaa korkeampiin hiilivetypäästöihin. (2, s. 91 - 95.)

Kiintoainepäästöt koostuvat palamattomasta tuhkasta ja palamatta jääneistä hiukkasista. Tuhkasta voidaan analysoida palamattomien komponenttien osuus, joka vaikuttaa kattilan hyötysuhteeseen alentavasti. (2, s. 91 - 95.)

Rikkidioksidi syntyy polttoaineen rikin hapettuessa polttoilman hapen kanssa tulipesässä. Tästä vielä pieni osa hapettuu edelleen rikkitrioksidiksi, joka reagoi vedessä veden kanssa muodostaa rikkihappoa. Rikkitrioksidien takia savukaasujen lämpötila pidetään kastepisteen yläpuolella, jotta lämpöpinnat eivät syöpyisi rikkihapon vaikutuksesta. Viranomaiset tarkkailevat voimalaitosten rikkidioksidipäästöjä, joilla on huonoja vaikutuksia vesistöille ja maaperälle. Suurimmat rikkidioksidipäästöt syntyvät öljyn ja hiilen poltossa. (2, s. 91 - 95.)

2.4.1 Typenoksidit

Typpioksideilla tarkoitetaan typpimonoksidia ja typpidioksidia, joita syntyy hapen reagoiessa typen kanssa. Hapen reaktio typpioksideiksi lasketaan kaavalla 1 (2, s. 92).



KAAVA 1

N_2 = typpimolekyyli

O_2 = happimolekyyli

NO = typpimonoksidi

NO_2 = typpidioksidi

Yleisesti typpimonoksidista ja typpidioksidista ei puhuta erikseen vaan päästöt ilmoitetaan näiden summana, jota kutsutaan NO_x-päästöiksi. Tulipesässä syntyy typpimonoksidia, joka lämpötilan laskiessa hapettuu typpidioksidiksi. Typen oksideista noin 95 % on typpimonoksidia ja 5 % typpidioksidia (8, s. 6). Yleisesti NO_x-päästöt kasvavat tulipesän lämpötilan tai ilmamäärän kasvaessa. Lisäksi suurena tekijänä vaikuttaa polttoaineen typpipitoisuus (8, s. 6). Typpioksidit happamoittavat ympäristöä, jonka takia niitä pyritään rajoittamaan tehokkaasti. (2, s. 92 - 94.)

Typpioksidien määrään vaikuttaa polttoaineen typpipitoisuus, tulipesän lämpötila ja ilmaylimäärä. Typen oksideja muodostuu kolmella eri tavalla:

- termisen typpioksidin muodostuminen, jossa palamisilman typpi reagoi palamisilman hapen kanssa korkeassa lämpötilassa
- nopea typpioksidin muodostuminen, jossa palamisilman happi ja typpi reagoivat hiilivetyradikaaleja sisältävässä liekin osassa
- polttoaineperäinen typpioksidin muodostuminen, jossa polttoaineen typpi reagoi palamisilman hapen kanssa. (2, s. 92 - 94.)

2.4.2 Päästöjen vähentäminen

Yleisesti NO_x-päästöt kasvavat tulipesän lämpötilan noustessa, jolloin termisten NO_x-päästöjen osuus kasvaa voimakkaasti (9, s. 100). NO_x-päästöjä on mahdollista vähentää niin sanotuilla ensisijaisilla tavoilla (primary methods), joissa palamiseen vaikutetaan polttoteknisin menetelmin. Näihin kuuluvat

- ilmanjako ja ilmaylimäärän säätely tulipesään
- tulipesän lämpötilan rajoittaminen
- alemman typpipitoisuuden omaavan polttoaineen polttaminen. (8, s. 14.)

Toissijaiset menetelmät (secondary methods) ovat savukaasupuhdistimet, jotka vaikuttavat savukaasuihin tulipesän jälkeen. Näihin kuuluvat SNCR- ja SCR-järjestelmät. (8, s. 6.)

2.4.3 Uudet päästörajat

Valtioneuvoston asetus suurten polttolaitosten päästöjen rajoittamiseksi (936/2014) asettaa uudet rajoitukset typpioksidin, rikkidioksidin, hiukkas- ja hiilimonoksidin päästöille polttolaitoksissa. Asetus on jaettu kahteen eri päästöarvoihin, joista taulukon 2 päästöarvot ovat tiukemmat kuin taulukon 3. Uusien energiatuotantoyksiköiden ja olemassa olevien kattiloiden, jotka ovat saaneet luvan toiminnan aloittamiseksi ennen ensimmäistä päivää heinäkuuta 1987 ja sitoutuneet käyttämään kattilaa apukattilana eli ei jatkuvassa käytössä, noudattavat taulukon 2 päästöarvoja.

TAULUKKO 2. NO_x-päästörajoitukset kiinteää tai nestemäistä polttoainetta käyttäville laitoksille, päästöraja-arvot ovat yksikössä mg/Nm³ (10)

| Polttoaineteho (P) MW | Biomassa ja turve | Kivihiili ja muut kiinteät polttoai- neet | Nestemäiset polt- toaineet |
|--------------------------|-------------------|---|-------------------------------|
| $50 \leq P \leq 100$ | 250 | 300 | 300 |
| $100 \leq P \leq 300$ | 200 | 200 | 150 |
| $P > 300$ | 150 | 150 | 100 |

Muut jo olemassa olevat kattilat käyttävät taulukon 3 mukaisia päästörajoituksia (10).

TAULUKKO 3. NO_x-päästörajoitukset kiinteää tai nestemäistä polttoainetta käyttäville laitoksille, päästöraja-arvot ovat yksikössä mg/Nm³ (10)

| Polttoaineteho (P) MW | Biomassa ja turve | Kivihiili ja muut kiinteät polttoai- neet | Nestemäiset polt- toaineet |
|--------------------------|-------------------|---|-------------------------------|
| $50 \leq P \leq 100$ | 300 | 300 | 450 |
| $100 \leq P \leq 300$ | 250 | 200 | 200 |
| $P > 300$ | 200 | 200 | 150 |

Valtioneuvoston asetuksesta suurten polttolaitosten päästöjen rajoittamisesta 2. luvun § 14:ssä todetaan seuraavaa: ”Päästöarvoja on noudatettu oikein, jos

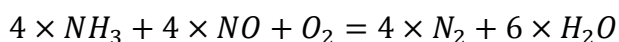
- yksikään raja-arvoon verrattava päästöjen kuukausittainen keskiarvo ei ylitä liitteiden raja-arvoja.
- yksikään raja-arvoon verrattava päästöjen vuorokausikeskiarvo ei ylitä 110 prosenttia liitteiden raja-arvoista.
- 95 prosenttia kaikista vuoden aikana raja-arvoon verrattavista päästöjen tuntikeskiarvoista ei ylitä 200 prosenttia liitteiden keskiarvoista.” (10.)

Lisäksi saman asetuksen samassa luvussa ja pykälässä todetaan myös: ”Raja-arvoon verrattavat vuorokausikeskiarvot ja tuntikeskiarvot määritetään mitatusta raja-arvoon verrattavista tuntikeskiarvoista, jotka saadaan vähentämällä mitatusta arvosta raja-arvopitoisuudesta laskettu mittaustuloksen 95 prosentin luotettavuutta kuvaava osuus. Mittaustuloksen 95 prosentin luotettavuutta kuvaava osuus on hiilimonoksidille 10 prosenttia päästöraja-arvosta, rikkidioksidille ja typenoksidoille 20 prosenttia päästöraja-arvosta ja hiukkasille 30 prosenttia päästöraja-arvosta.” (10.)

2.5 SNCR

SNCR-järjestelmällä vähennetään kattilalaitoksissa NO_x-päästöjä ruiskuttamalla tulipesään ammoniakkia tai ureaa. Järjestelmä on hyödyllinen kattiloissa, joissa typpioksidipäästöjä ei saada tarpeeksi alhaisiksi polttoteknisin menetelmin.

Urea tai ammoniakki sekoittuessaan savukaasuihin reagoi typpioksidien kanssa muodostaen lopputuotteena vettä ja puhdasta typpeä. Ammoniakille reaktio lasketaan kaavalla 2 (8, s. 14 - 15).



KAAVA 2

NH_3 = ammoniakki

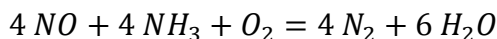
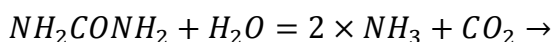
NO = typpimonoksidi

O_2 = happimolekyyli

N_2 = typpimolekyyli

H_2O = vesi

Urealle reaktio lasketaan kaavalla 3 (8, s. 14).



KAAVA 3

NH_2CONH_2 = urea

H_2O = vesi

NH_3 = ammoniakki

CO_2 = hiilidioksidi

NO = typpimonoksidi

O_2 = happimolekyyli

N_2 = typpimolekyyli

Reaktio tarvitsee tietyn lämpötilan tapahtuakseen tehokkaasti. Jotta savutetaan maksimaalinen typpioksidien reduktio ja minimaaliset ammoniakin raakapäästöt, kemikaali tulee ruiskuttaa oikean lämpöiseen savukaasuvirtaan. Lisäksi kemikaali tarvitsee riittävän viipymääjan ja hyvän sekoittumisen savukaasuihin. (8, s. 14 - 15.)

Optimaalisin ruiskutus lämpötila on 850 - 1 000 °C. Urea tai ammoniakki tulee ruiskuttaa oikeaan tasoon kattilaa. Urealle lämpötila-alue on hieman korkeampi kuin ammoniakille. (8, s. 14 - 15.)

SNCR-järjestelmällä ei ole katalyyttia, jonka takia savukaasujen lämpötila tulee olla tarpeeksi korkea reaktion tehokkaan käynnistymisen kannalta. Osakuormilla haluttu reaktioaika voi olla liian lyhyt johtuen tulipesän alhaisemmasta lämpötilasta, joka aiheuttaa NH_3 -slippiä eli ammoniakin raakapäästöjä. Lisäksi savukaasun lämpötila ei saa olla liian korkea, koska tällöin ammoniakki hapettuu typpioksidiksi eikä saavuteta haluttua reduktiota. (8, s. 14 - 15.)

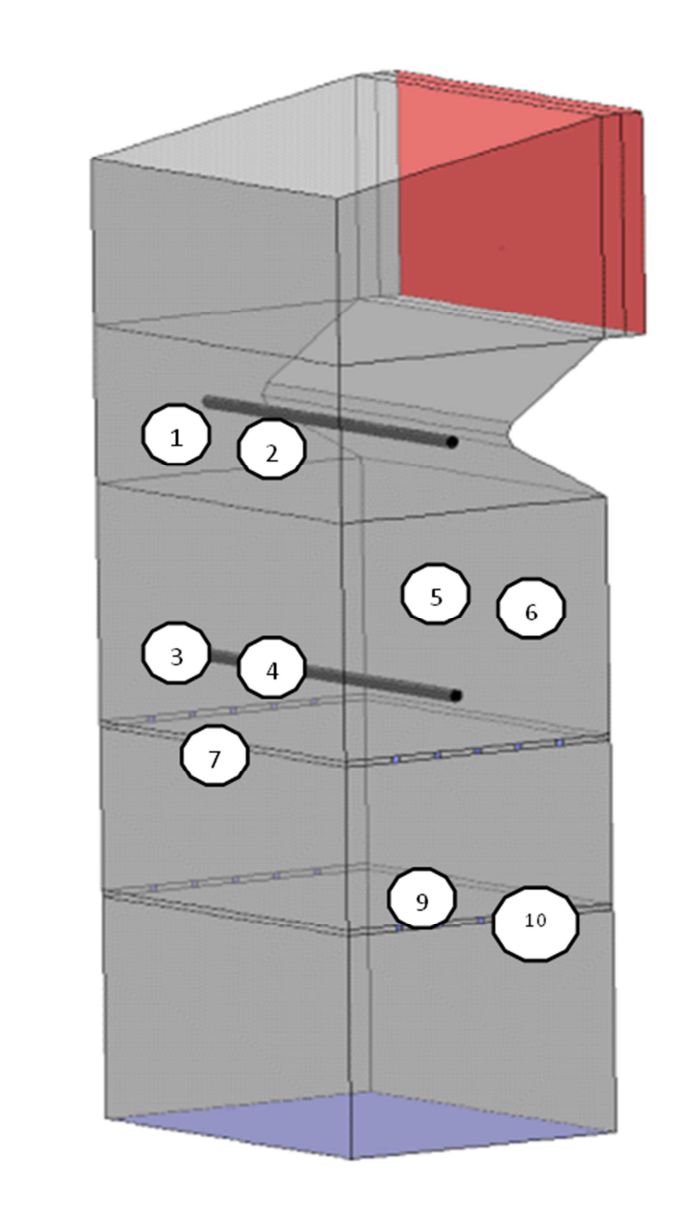
Kattiloihin tulee yleisesti 2 - 3 ruiskutasoa, joilla saadaan aikaan leijupetikattiloissa 25 - 50 %:n reduktio ja kiertopetikattiloissa 40 - 70 % reduktio. Kiertopetikattiloiden parempi reduktio johtuu tulipesän tasaisemmista lämpötiloista, jolloin järjestelmän hyötysuhde on parempi. (8, s. 14 - 15.)

3 LÄMPÖTILOJEN MITTAAMINEN JA MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI

Tavoitteena oli paikoittaa optimaalisimmat suutinpaikat SNCR-järjestelmälle K3-kattilaan. K3-kattilassa NO_x -päästöt ovat 400 - 450 mg/Nm^3 . Päästöjä yritetään uuden laitteiston avulla alentaa. Uusien päästörajoitusten mukaan K3-kattilalla tulisi päästä alle 250 mg/Nm^3 NO_x -päästöihin.

3.1 Kattilan lämpöprofilointi

K3-kattilaan oli tehty valmiit mittauspisteet, joista lämpötiloja mitattiin termoelementeillä, jotka olivat 3,5 tai 5 metriä pitkien suojauputkien sisällä. Tulokset taulukoitiin, jossa otettiin huomioon kattilan höyrykuorma ja polttoainejakauma. Tuloksia ottaessa tuli seurata myös turpeen laatua polttoaineena. Mittaukset suoritettiin kerroksissa 4 - 7, jotka vastaavat 16,95 - 30,65 m:n korkeutta merenpinnasta (kuva 5).



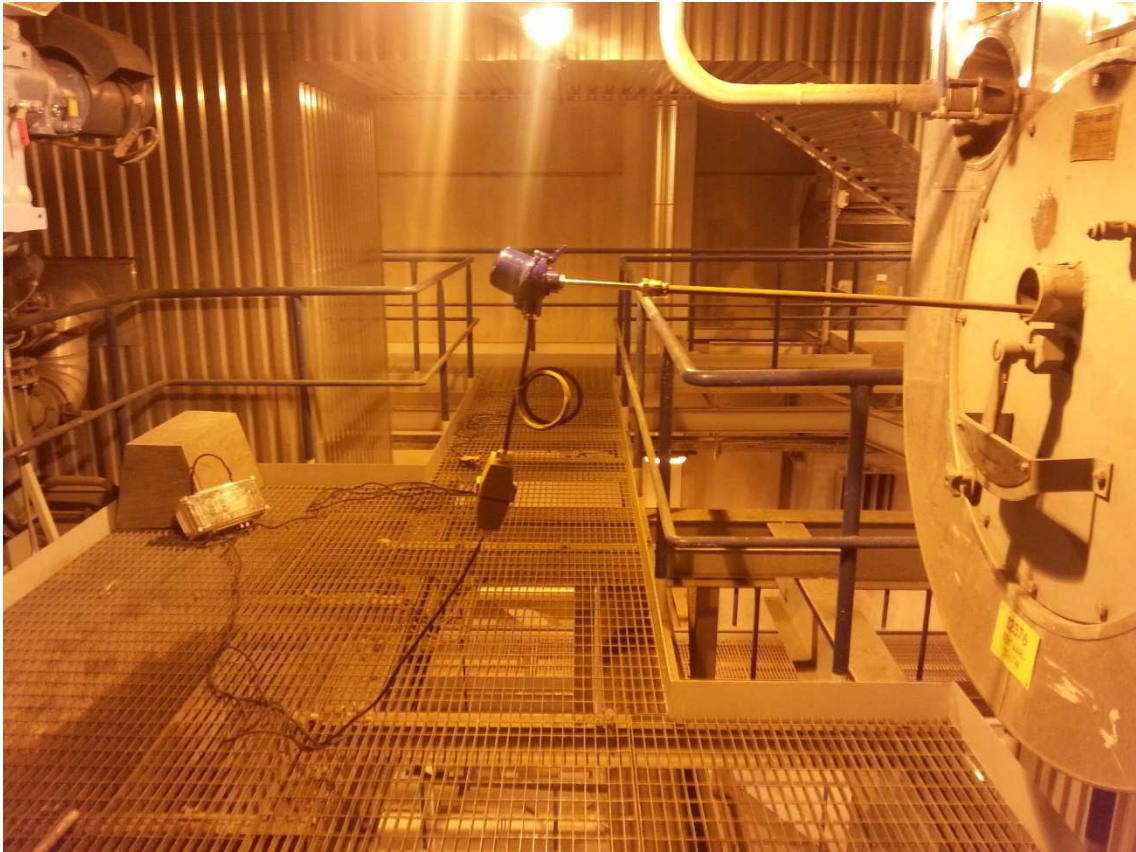
KUVA 5. Mittauspaikat sijaitsivat kerroksissa 4 - 7; mittauspaikkoja oli tulipesän etu- ja takaseinällä kuvan mukaisesti

Seitsemännen kerroksen etuseinän mittauspiste oli miesluukku, johon oli asennettu suojalevy mittauksien ajaksi. Mittaukset suoritettiin kyseisessä kerroksessa viiden metrin pituisella termoelementillä. (Kuva 6.)



KUVA 6. Seitsemännen kerroksen miesluukkua käytettiin mittauspisteenä

Muissa mittauspaikoissa käytettiin hyväksi näkölaseja. Kuva 7 on kuudennen kerroksen takaseinältä, jossa mittaukset suoritettiin myös viiden metrin termoelementillä.



KUVA 7. Kuudennen kerroksen näkölasia käytettiin mittauspisteenä

3.2 Urean koeajot

Urean koeajot järjestettiin tammikuussa 2015 Valmet Oyj:n järjestämänä. K3-kattilalle tehtiin kaksi ureansyöttötasoa, jotka olivat kuudennessa ja neljännessä kerroksessa. Ylempi taso oli tarkoitettu suuremmille höyrykuormille ja alempi vastaavasti kattilan osakuormille.

Päällyspellin ja eristeiden irrottamisen jälkeen suuttimet laitettiin pienestä suuttimen putken paksuisesta aukosta tulipesän sisään höyrystinputkien välistä. Kuvassa 8 näkyy koeajoissa käytetty suutin asennettuna tulipesään.



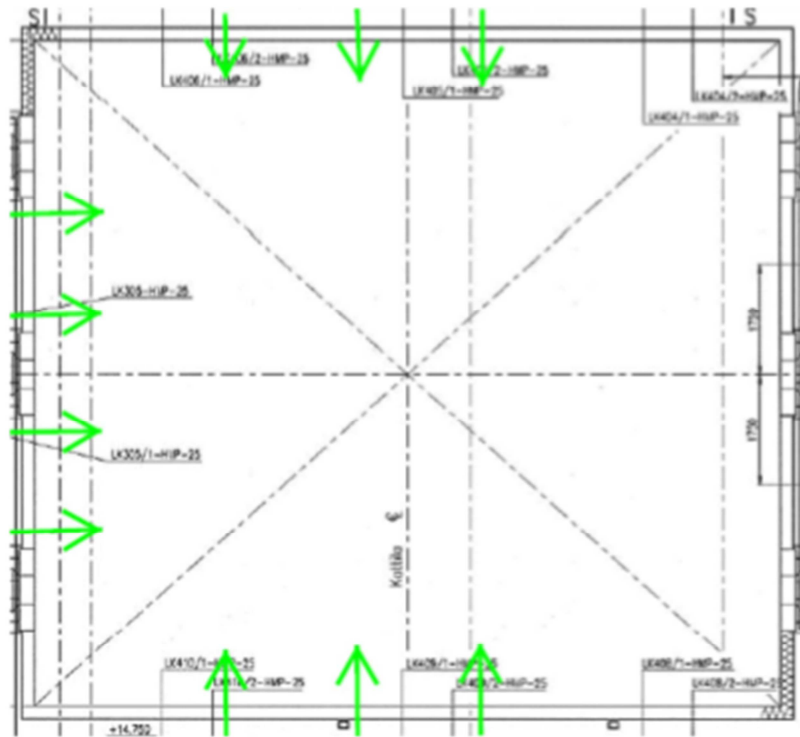
KUVA 8. Ureasuutin asennettuna tulipesään

Suutinpaikat oli tehty Stora Enson toimesta jo valmiiksi tulipesän seinämille koeajoja varten. Kuvan 9 keskellä näkyvä ruuvi otettiin urean koeajoissa irti, minkä jälkeen suutin saatiin laitettua reiästä tulipesään.



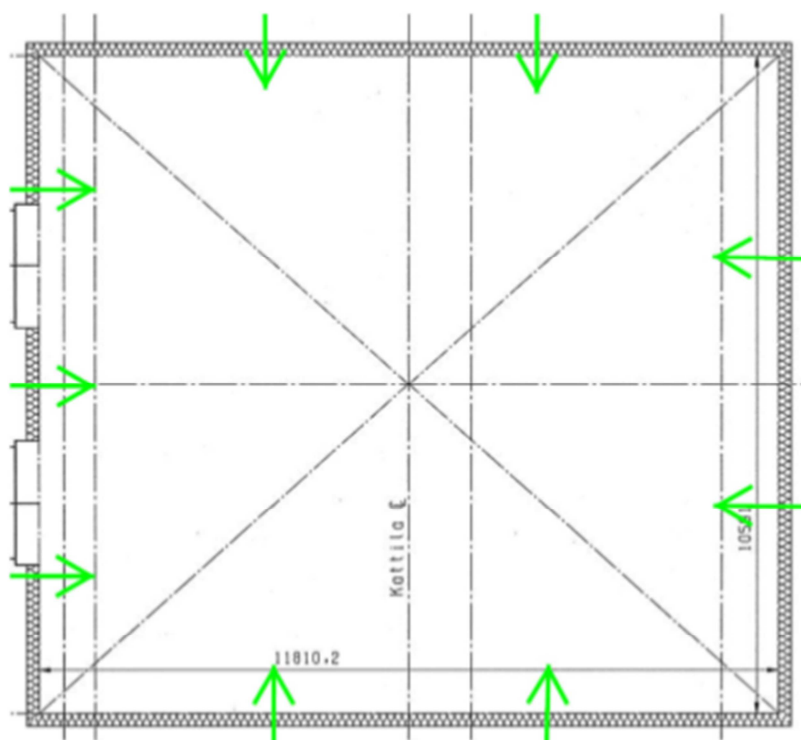
KUVA 9. Höyrystinputkien välistä kierrelliitoksella oleva ruuvi poistettiin, jonka jälkeen suutin voitiin asentaa reiästä tulipesään

Valmetin venttiilipöydässä oli paikkoja ainoastaan seitsemän, joten tuli mietittyä oikeanlaista venttiiliasetelmaa ja kokeiltua erilaisia asetelmia, joilla saataisiin mahdollisimman hyvä reduktio aikaan. Mahdollisia suutinpaikkoja oli tehty urean koeajoja varten ylätasen etuseinälle neljä, vasemmalle seinälle kolme ja oikealle seinälle kolme (Kuva 10).



KUVA 10. Mahdolliset suutinpaikat ylätasolla, joka oli kuudennessa kerroksessa (11, s. 6)

Alemmalla syöttötasolla suuttimia varten tehdyt reiät olivat sijoittuneet siten, että etuseinällä oli kolme paikkaa, vasemmalla seinällä kaksi paikkaa, oikealla kaksi paikkaa ja takaseinällä kaksi paikkaa. Takaseinän suutinpaikkoja ei tarvinnut käyttää ollenkaan urean koeajoissa. (Kuva 11).



KUVA 11. Mahdolliset suutinpaikat alatasolla, joka oli neljännessä kerroksessa (11, s. 6)

Koeajoviikolla käytettiin ureavesiliuosta, jonka väkevyys oli 32,5 %. Tulipesään syötetyn urealiuoksen määrää pidettiin vakiona testijaksojen aikana eikä urean syöttömäärään ollut takaisinkytkentää NH_3 mittauksesta.

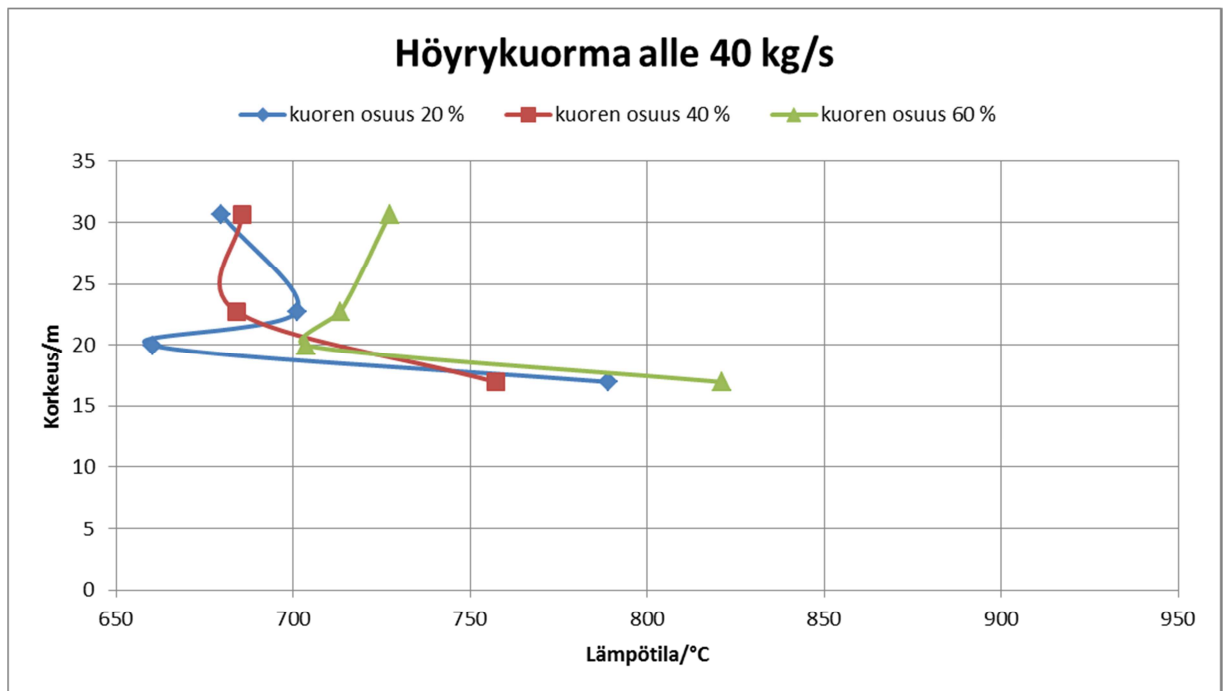
Koeajoviikolla saatiin hyviä tuloksia aikaan. Silloin löydettiin tehokkaasti toimivat suutinpaikat ja sopiva ureansyöttövirtaus.

3.3 Lämpötilakäyrien analysointi

Lämpötilamittauksista tulipesän eri korkeuksilla on tehty eri höyrykuormille erilliset kuvaajat, joissa eri käyrät kuvaavat kuoren ja turpeen osuutta polttoaineessa. Pystyakselilla on tulipesän korkeus merenpinnasta metreissä ja vaakakselilla tulipesän lämpötila kyseisellä tulipesän korkeudella. Analyysit on tehty ABB-trendihistorian avulla, jotka ovat liitteinä 2 - 7.

3.3.1 Höyrykuorma alle 40 kg/s (liite 2)

Kuvassa 12 näkee, että 40 %:n kuoriosuuden käyrästä puuttuu 20 m:n korkeudelta mittaustulos, jonka takia käyrä on erilainen kuin muut käyrät. Mittapisteen puuttuminen on seurausta työn alussa huonon mittaustilan valinnasta, minkä seurauksena mittatulokset jouduttiin mittaamaan uudelleen kiireellisellä aikataululla ja jotkin kyseisen tason mittaustulokset jäivät mittaamatta kokonaan aika-ongelman takia.



KUVA 12. Lämpötilakäyrät höyrykuorman ollessa alle 40 kg/s

Tulipesässä kuumin kohta matalilla höyrykuormilla on tulipesän alaosa, koska leijuilman ja sekundääri-ilman osuudet ovat niin suuret (kuva 12). Kattilan höyrytehon laskiessa alle 40 kg/s leijuilman osuus nousee 40 - 48 %:iin kaikista polttoilmoista kiertokaasu mukaan lukien. Kyseinen 40 - 48 % vastaa määrällisesti 20 - 23 kg/s polttoilmaa. Sekundääri-ilma pysyy stabiilina, mutta senkin osuus on suuri, 31 - 36 %, joka määrässä tarkoittaa 15 - 16 kg/s polttoilmaa. Tertiäri-ilman osuus pysyy 8 %:ssa, joka vastaa 3 - 4 kg/s polttoilmaa. Tämän seurauksena tulipesän kuumimmat kohdat ovat alaosissa. Alaosassa oleva kuumin savukaasu myös jäähtyy voimakkaasti sekundääri-ilmatason jälkeen. Savukaasun

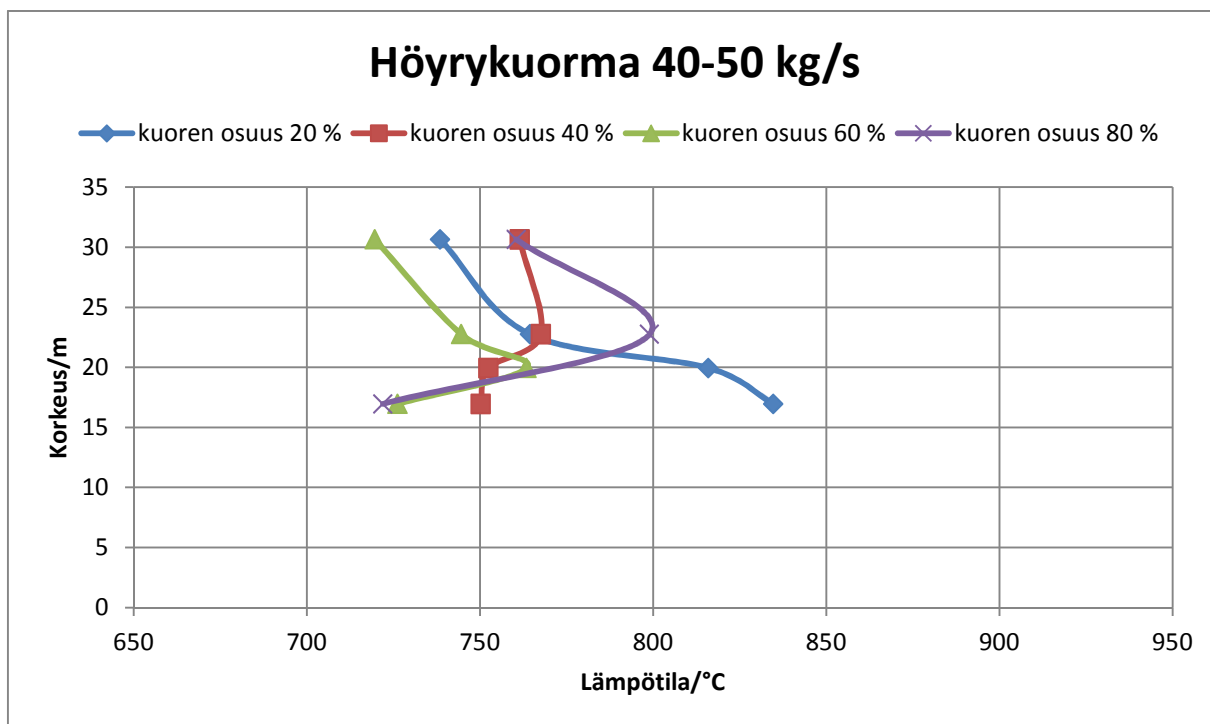
saavuttaessa tertiääri-ilmataso tapahtuu vielä palamista, minkä takia lämpötilakäyrä nousee hetkellisesti ennen jäähtymistä ja siirtymistä tulistinkanavaan.

ABB:n trendiviivoista ei saa selvyyttä, miksi 20 % kuoriosuudella lämpötila 30 m:n korkeudessa tulee alhaisemmaksi kuin kuoriosuudella 40 %. Lisäksi kuoren osuuden ollessa 20 % lämpötilat heittävät voimakkaasti koko tulipesän korkeudella, mille trendiviivoista ei voi sanoa selvää syytä. Ainoana poikkeuksena trendiviivoista voidaan nähdä, että kuoren osuuden laskiessa 20 %:iin tulipesän ilmamäärä laskee hieman, mutta ilmajaossa ei tapahdu huomattavia muutoksia. Aavistuksen suuremmat ilmapähennykset ovat sekundääri- ja tertiääri-ilmoilla kuin leijuilmalli. Tämän ei pitäisi vaikuttaa kuitenkaan savukaasujen tulipesän loppulämpötilaan näin radikaalisti.

Heinäkuussa 2014 NO_x-päästöjen määrä on noin 320 mg/Nm³ höyrykuorman ollessa noin 33 kg/s ja kuoren osuuden polttoaineesta ollessa noin 50 - 60 %. NO_x-päästöt nousevat hieman tarkastelupisteen jälkeen, koska höyrykuormat kasvavat ja turpeen osuus nousee polttoaineseoksessa. Joulukuun 2014 keskimääräinen höyrykuorman arvo on noin 50 kg/s ja kuoren osuus noin 45 %. Tällöin NO_x-päästöt ovat noin 380 mg/Nm³.

3.3.2 Höyrykuorma 40 - 50 kg/s (liite 3)

Kuvasta 13 näkee, että 80 % kuoriosuudella puuttuu mittaustulos 20 m:n korkeudelta. Siksi lämpötilakäyrän muoto on erilainen kuin muilla käyrillä.



KUVA 13. Lämpötilakäyrät höyrykuormien ollessa 40 - 50 kg/s

20 %:n kuoriosuudella käyrän muoto on kokonaan erilainen kuin muilla kuoriosuuden lämpötilakäyrillä. Ilmajaot ja -määrät muuttuvat ainakin alle 40 kg/s höyrykuormilla selvästi, minkä seurauksena lämpötilakäyrän muoto voisi olla selitettävissä. Kuoriosuuden ollessa 20 % tulipesän kuumin paikka on tulipesän alaosissa (kuva 13).

Kuoriosuuden laskiessa 40 %:sta 20 %:iin leijuilman osuus nousee 40 %:sta 60 %:iin, mutta määrällisesti leijuilma laskee 30 kg/s:sta 25 kg/s:aan. Sekundääri-ilman osuus muuttuu 34 %:sta 24 %:iin, joka määrässä tarkoittaa laskua 22 kg/s:sta 11 kg/s:aan. Tertiääri-ilman osuus laskee 15 %:sta 7 %:iin, joka määrässä tarkoittaa laskua 11 kg/s:sta 3 kg/s:aan. Kiertokaasun osuus muuttuu 13 %:sta 10 %:iin, joka määrässä on 7 kg/s:sta 4 kg/s:aan. Aikaväli ei ole täysin tarkastelukelpoinen, koska polttoaineen kuoren muutoksen aikaan on myös tapahtunut notkahdus höyrykuormissa. Tämä vaikuttaa todennäköisesti myös ilmamääriin. Ilmajako on enemmän paikkaansapitävä suure tässä tarkastelussa.

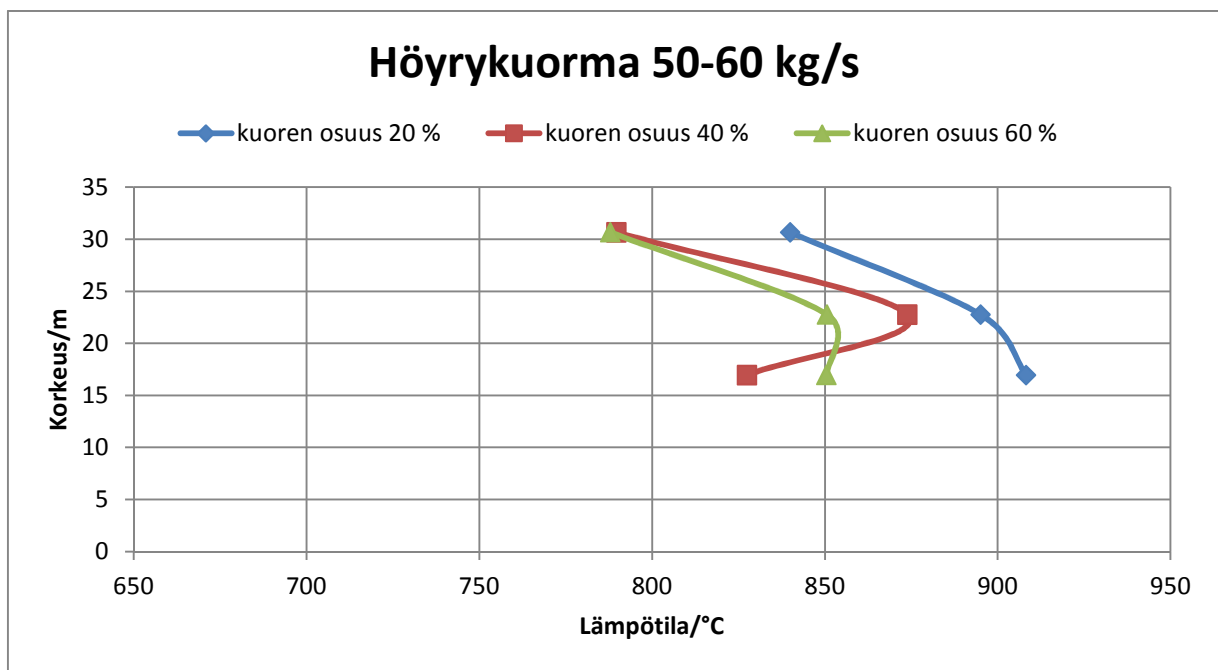
Lämpötilakäyrät 60 %:n kuoriosuudella ja 40 %:n kuoriosuudella risteävät 20 m:n mittauspaikassa (kuva 13). Ilmajaoissa ei tapahdu erikoisempia muutoksia.

Kun kuoren osuus muuttuu 42 %:sta 61 %:iin, leijuilman osuus pysyy samanlaisena. Muutos leijuilmassa on 51 %:sta 52 %:iin, joka määrällisesti tarkoittaa muutosta 28 kg/s:sta 30 kg/s:aan. Sekundääri-ilman osuus pysyy 33 %:ssa, mutta määrässä kasvaa 18 kg/s:sta 19 kg/s:aan. Tertiääri-ilman osuus nousee 8 %:sta 9 %:iin, mutta määrässä arvo laskee 5 kg/s:sta 4 kg/s:aan. Kiertokaasun osuus laskee 8 %:sta 6 %:iin, mutta määrä pysyy stabiilina 5 kg/s:ssa. Ilmoissa ei tapahdu suurempia muutoksia millä voisi selittää lämpötilakäyrien risteämisen 20 m:n korkeudella. Mahdollinen muutos voi johtua polttoaineen laadun vaihteluista, joita liitteenä olevilta trendiviivoilta ei voi tarkastella.

NO_x-päästöt kyseisellä höyrykuormalla ovat 450 - 470 mg/Nm³ höyrykuorman ollessa 43 kg/s ja kuorenosuuden polttoaineesta ollessa 46 %. Vertailukohtana samalla höyrykuormalla, mutta kuoren osuuden noustessa 46 %:sta 56 %:iin NO_x-päästöjen pitoisuus laskee 415 - 455 mg/Nm³:aan.

3.3.3 Höyrykuorma 50 - 60 kg/s (liite 4)

50 - 60 kg/s höyrykuormilla puuttuu 80 %:n kuoriosuudella lämpötilakäyrä kokonaan ja lisäksi mitatuista käyristä ei ole saatu 20 m:n mittaustuloksia alkuun virheellisen mittauspäikän valinnan takia (kuva 14).



KUVA 14. Lämpötilakäyrät höyrykuorman ollessa 50 - 60 kg/s

50 - 60 kg/s höyrykuormilla lämpötilakäyrät ovat melko samantyylliset. Kyseisellä höyrykuormalla kuumin kohta tulipesässä on noin 23 m:n korkeudessa eli tertiääri-ilmasuuttimien tasolla. Kuoren osuuden ollessa alhaisempi kuumin kohta tulee alemmas tulipesää. (Kuva 14.)

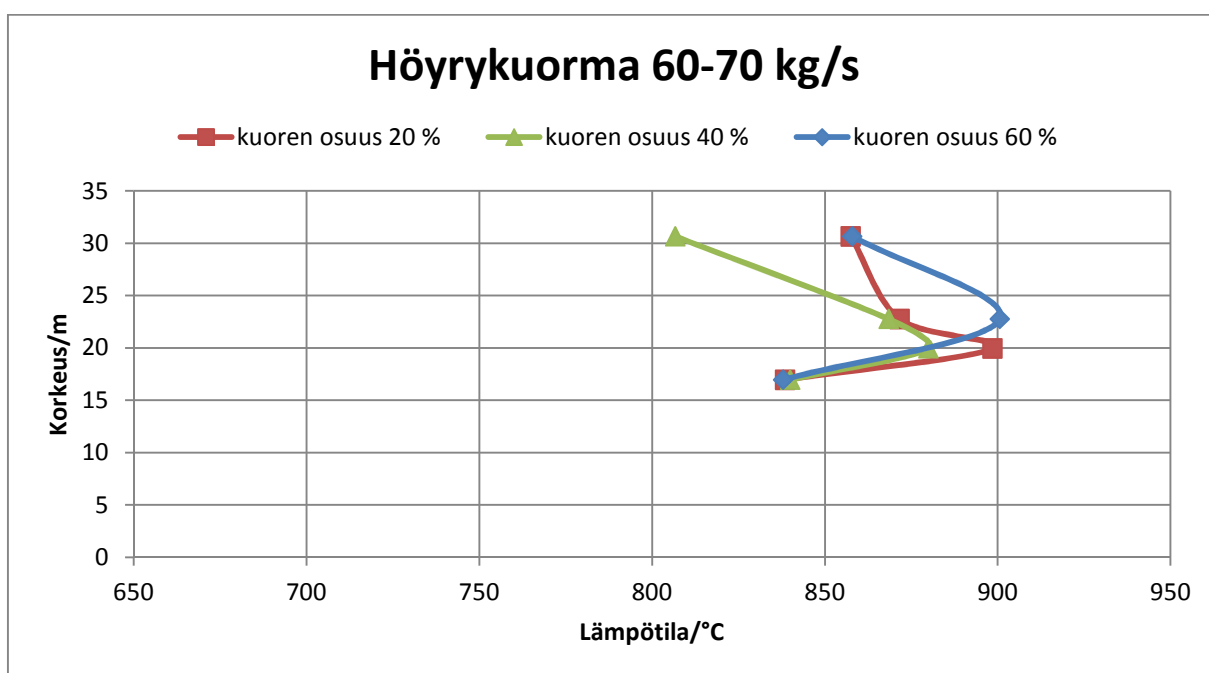
Lämpötilakäyrät kuorenosuudella 40 % ja 60 % risteävät (kuva 14). Trendikäyrästä selviää kuoren osuuden laskiessa 63 %:sta 50 %:iin, että ainoastaan leijuilman ja kiertokaasun osuudet muuttuvat. Leijuilman osuus nousee 44 %:sta 46 %:iin, joka tarkoittaa määrässä 27 kg/s:sta 30 kg/s:aan. Kiertokaasun osuus laskee 9 %:sta 6 %:iin, mikä tarkoittaa määrän vähenemistä 6 kg/s:sta 4 kg/s:aan. Trendiviivojen arvot eivät ole täysin luotettava, koska korkeamman kuoriosuuden ajaminen on tapahtunut rajallisen ajan. Kuoren osuus on ollut korkeampi noin 6 tunnin ajan, jolloin ei ole täyttä varmuutta kuinka suuri osuus todellisuudessa kuorta on ollut tulipesässä palamassa ja ovatko ilmat tasoittuneet uuden polttoainejakauman mukaan. Toiseksi verrattavissa arvoissa kuoren osuus ei laske tarpeeksi alas vaan ainoastaan 50 %:n tasolle.

Höyrykuorman ollessa 53 kg/s ja kuoren osuuden ollessa 54 % NO_x-päästöt ovat 260 - 300 mg/Nm³. Vertailukohtana höyrykuorman ollessa sama ja kuo-

riisuuden noustessa 54 %:sta 65 %:iin NO_x-päästöt laskevat 229 - 249 mg/Nm³:aan.

3.3.4 Höyrykuorma 60 - 70 kg/s (liite 5)

60 - 70 kg/s höyrykuormalla lämpötilakäyrä 80 %:n kuoriosuudella puuttuu kokonaan, koska korkeisiin höyrymääriin on haastavaa päästä suurella kuoriosuudella alhaisemman lämpöarvon takia. 60 %:n kuoren osuudella puuttuu mittaus-tulos 20 m:n korkeudelta alun perin väärän mittaustaikinan valinnan takia. Tästä syystä lämpötila käyrä on hieman erilainen muihin käyriin verrattuna. (Kuva 15.)



KUVA 15. Lämpötilakäyrät höyrykuorman ollessa 60 - 70 kg/s

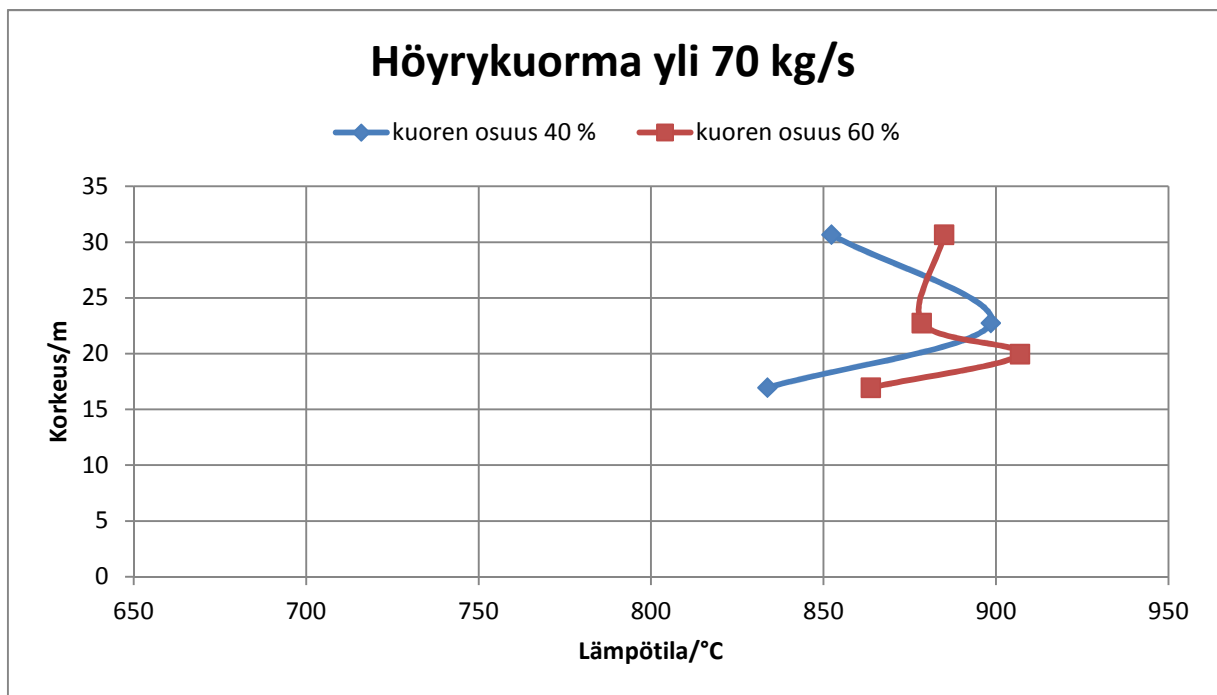
Koska korkeammat höyrykuormat ovat harvinaisempia K3-kattilassa, on vaikea löytää trendihistoriasta aikaväliä, josta voisi analysoida kyseisiä lämpötiloja. Tämän takia ei ole mahdollisuutta tutkia esimerkiksi 40 %:n kuoriosuudella syitä miksi lämpötila laskee voimakkaasti juuri kyseisellä kuoriosuudella tertiääri-ilmatason ja tulipesän nokan välillä (kuva 15).

60 - 70 kg/s höyrykuormalla ei löytynyt trendihistoriasta sopivaa aikaväliä, josta voisi tehdä vertailua esimerkiksi ilmajaoista kuoriosuuden muuttuessa tulipesässä. Höyrykuorman ollessa 64 kg/s ja kuorenosuus polttoaineesta ollessa

55 % leijuilman osuus on 42 %, sekundääri-ilman osuus 31 %, tertiääri-ilman osuus 21 % ja kiertokaasun osuus 5 %. Edellä mainitut ilmaosuudet vastaavat määrässä leijuilmalle 32 kg/s, sekundääri-ilmalle 24 kg/s, tertiääri-ilmalle 16 kg/s ja kiertokaasulle 4 kg/s. NO_x-päästöjen todellista arvoa ei ole saatu 13.3. jälkeen, koska mittaustulokset ovat muuttuneet radikaalisti. NO_x-päästöjen mittaamiseen tarvitaan kalibrointia.

3.3.5 Höyrykuorma yli 70 kg/s (liite 6)

Yli 70 kg/s höyrykuormilla puuttuu käyrät kokonaan kuoren osuuksille 20 % ja 80 %. 40 %:n kuoriosuudella mittaustulos 20 m:n korkeudelta puuttuu alkuun väärin paikoitetun mittauspaikan takia. (Kuva 16.)



KUVA 16. Lämpötilakäyrät höyrykuorman ollessa yli 70 kg/s

Yli 70 kg/s höyrykuormat ovat harvinaisia K3-kattilalla, minkä takia mittaustulostenkin saaminen oli haastavaa. Ainoat mittaustulokset yli 70 kg/s höyrykuormalta saatiin, kun sellutehdas oli alhaalla. Tällöin höyryn tuoton vastuu on kokonaan K3-kattilalla soodakattilan ollessa alhaalla.

Höyrykuorman ollessa 77 kg/s ja kuoren osuuden polttoaineesta ollessa 50 % leijuilman osuus polttoilmasta on 44 %, sekundääri-ilman osuus 26 %, tertiääri-ilman osuus 31 % ja kiertokaasun osuus 0 %. Määrällisesti edelliset osuudet vastaavat leijuilmalle 40 kg/s, sekundääri-ilmalle 24 kg/s, tertiääri-ilmalle 28 kg/s ja kiertokaasulle 0 kg/s. Huomioitavaa edellisessä on, että tertiääri-ilman osuus on suurempi kuin sekundääri-ilman osuus.

Trendiviivahistoriasta löytyy myös toinen aikaväli, jossa höyrykuorma on suurin piirtein saman verran (72 kg/s), mutta myös kuoren osuus muuttuu nopeasti samalla korkean höyrykuormapiikin aikana, joka voi vaikuttaa ilmojen suhteeseen. Kyseisessä 72 kg/s höyrykuorman kohdalla sekundääri-ilman osuus on 30 % ja tertiääri-ilman osuus on 24 %. Nämä vastaavat sekundääri-ilmalle 26 kg/s ja tertiääri-ilmalle 22 kg/s ilmamäärää. Sekundääri-ilman ja tertiääri-ilman suhde on päinvastainen kuin aikaisemmassa tapauksessa hieman korkeammalla höyrykuormalla. Tällä muutoksella voi olla vaikutus lämpötilakäyriin, jossa kuoren osuudella 60 % savukaasujen lämpötila nousee vielä tertiääri-ilmatason jälkeen. Vastaavasti 40 % kuoriosuudella savukaasujen lämpötila laskee selkeästi tertiääri-ilmatason jälkeen. (Kuva 16.)

3.4 Optimaalisten suutintasojen määrittäminen

K3-kattilaa ajetaan yleisesti todella pienillä kuormilla soodakattilan ja sellutehtaan ollessa normaalitoiminnassa. Kesällä höyrykuormat ovat yleisesti alle 40 kg/s ja talvisinkin 40 - 50 kg/s. Suurimmat höyrykuormat aiheutuvat sellutehtaan alhaalla olostä ja paperitehtaiden päällä olostä. K3-kattilan nimellishöyryn tuotto on 95 kg/s.

Optimaalisimpia suutintasoja on määritetty todella pitkälle urean koeajoista saatujen tietojen perusteella. Valmet Oyj:n raportista saatiin selville eri höyrykuormia, urean syöttömääriä, NH_3 -slippejä ja NO_x -päästöjen reduktioita hyväksi käyttämällä syöttötasojen suuntaa antavat optimaalisimmat urean syöttötasot. Lisäksi urean koeajoissa käytettyjä tasojen on mietitty paremmiksi lämpötilakäyrien avulla. (Liite 7.)

3.4.1 Höyryn tuotto alle 40 kg/s (liite 8)

Ainoassa alle 40 kg/s höyrykuorman testipisteessä reduktio saatiin 45 %:iin, jolloin NH_3 -slippi nousi 9 mg/ Nm^3 :aan. NH_3 -slippin nousu oli kuitenkin melko vähäistä normaalitasoon verrattaessa. 213 kg/h urean syöttömäärällä lopullinen NO_x -päästöjen määrä oli 255 mg/ Nm^3 . (Liite 7.)

Hienoinen NH_3 -slippin nousu on mahdollisesti seurausta siitä, että urean syöttötason lämpötila ei ole tarpeeksi korkea. Tällöin osa ammoniakista pääsee raakana läpi reagoimatta savukaasujen kanssa. (Liite 7.)

Alle 40 kg/s höyrykuormalla lämpötilakäyrä on huomattavasti erilainen verrattuna muiden höyrykuormien lämpötilakäyriin. Näin alhaisella höyrykuormalla tulipesän kuumin kohta on pohjalla ja savukaasut jäähtyvät voimakkaasti kunnes saavuttavat 20 m korkeuden tulipesässä. Tästä syystä urean syöttötason tulee olla alempana kuin 17,5 m:n korkeudessa, joka oli käytetyn syöttötason korkeus urean koeajoissa kyseisellä höyrykuormalla. Lievä NH_3 -slippin nousu on mahdollisesti johtunut savukaasujen liian alhaisesta lämpötilasta kyseisellä urean syöttökorkeudella, joten optimaalisin syöttötaso alle 40 kg/s höyrykuormille todennäköisesti olisi noin 15 m:n korkeudella. Tällöin mahdollisesti saataisiin paremmaksi NO_x -päästöjen reduktiota ja vähennettyä NH_3 -slippiä. (Liite 7.)

3.4.2 Höyryn tuotto 40 - 50 kg/s (liite 8)

40 - 50 kg/s höyrykuormalla reduktio saatiin todella korkeaksi. Urean syötön ollessa 327 kg/h reduktio nousi 58 %:iin. NH_3 -slippissä ei tapahtunut hälyttävää nousua urean syötön aikana. Arvo oli 10 mg/ Nm^3 . NO_x -päästöt olivat koeajon aikana 209 mg/ Nm^3 . (Liite 7.)

Kyseinen koeajojen syöttötaso vaikuttaisi optimaaliselta tasolta johtuen erittäin hyvästä NO_x -päästöjen reduktiosta ja pienestä NH_3 -slippin noususta. Syöttötaso oli koeajoissa 17,5 m:n korkeudessa. (Liite 7.)

3.4.3 Höyryn tuotto 50 - 60 kg/s (liite 8)

50 - 60 kg/s höyrykuormalla saatiin paras reduktio 245 kg/h urea määrällä. NO_x -päästöjen reduktio oli 47 %, mutta NH_3 -slippi nousi hieman huolestuttavasti.

NH₃-slippi oli 16 mg/Nm³. NO_x-päästöt ureansyötön aikaan olivat 215 mg/Nm³ (Liite 7.)

Optimaalisin urean syöttötaso olisi koeajotasoa hieman alempi, jolloin läpi menevän NH₃-slippin määrä vähenisi, koska reaktioaika pidentyisi. Tällöin myös NO_x-päästöjen reduktio saataisiin nousemaan vielä korkeammaksi aikaisemmasta 47 %:sta. Kun koeajoissa käytettyä 26 m tasoa laskettaisiin 22,5 m:iin tai mahdollisesti jopa 20 m:iin, olisivat tulokset todennäköisesti paremmat. Optimaalisen syöttötason korkeutta on hieman vaikeampi päätellä, koska kyseisellä höyrykuormalla lämpötila-arvo puuttuu 20 m:n korkeudesta. Lämpötila käyrä on vajavainen eikä tiedetä tarkasti miten lämpötila käyttäytyy kyseisellä 20 m:n korkeudella. (Liite 7.)

3.4.4 Höyryn tuotto 60 - 70 kg/s

Urean koeajoissa ei otettu testipistettä 60 - 70 kg/s höyrykuormalla, joten ei ole täydellistä varmuutta millainen vaikutus urean syötöllä olisi ollut NO_x-päästöihin. Voidaan kuitenkin olettaa lämpötilakäyrän ollessa samantyylinen kuin yli 70 kg/s höyrykuorman lämpötilakäyrä ja lämpötilan olevan ainoastaan 20 - 30 °C:ta alhaisempi koeajojen syöttötasolla, että reduktio olisi lähes sama kuin yli 70 kg/s höyrykuormalla. (Liite 7.)

3.4.5 Höyryn tuotto yli 70 kg/s (liite 8)

Kyseisellä höyrykuormalla päästiin 33 %:n reduktioon 294 kg/h urean syöttömäärällä. NH₃-slippin nousu oli maltillista ja urean syötön aikaiset NO_x-päästöt olivat 257 mg/Nm³. (Liite 7.)

Kyseisellä höyrykuormalla olisi ollut mahdollista kokeilla vielä suurempaa urean syöttöä, jolloin reduktiota olisi mahdollisesti saatu vielä nostettua ilman huomattavaa NH₃-slippin nousua. Koeajoissa käytetty 26 m:n korkeudella oleva syöttötaso oli todennäköisesti optimaalisin kyseisellä höyrykuormalla. (Liite 7.)

4 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli lämpötilamittausten ja urean koeajoista saatujen tietojen perusteella valita optimaaliset urean syöttötasot K3-kattilalle. Optimaalisella syöttötasolla NO_x -päästöjen reduktio saadaan tapahtumaan tehokkaalla hyötysuhteella ja vähäisillä ammoniakkin raakapäästöillä.

NO_x -pitoisuudet vaihtelevat höyrykuormien vaihdellessa. Suuremmilla höyrykuormilla NO_x -päästöt ovat alhaisemmat kuin pienemmillä höyrykuormilla. Päästöihin vaikuttaa myös polttoaineseoksessa oleva turpeen osuus.

NO_x -päästöjen reduktiot ovat suuremmat alhaisilla höyrykuormilla, mikä on hyvä, koska päästöt ovat suuremmat kyseisillä höyrykuormilla. Optimaalisella suutintasolla saadaan todennäköisesti NO_x -päästöt alle 250 mg/Nm^3 , jota uudet päästörajoitukset vaativat. Päästöt urean syötön aikaan kuitenkin ovat lähellä päästörajoitusten ylärajaa, joten päästöillä ei ole lähes ollenkaan liikkumavaraa ylöspäin. Todennäköisesti myös turpeen osuutta polttoaineseoksessa joudutaan alentamaan, jotta pysyttäisiin päästörajoitusten alapuolella.

Suurilla höyrykuormilla lähtötaso NO_x -päästöissä on alhaisempi, jolloin urean koeajoissa saadut alhaisemmat NO_x -päästöjen reduktiot riittävät uusien päästörajoitusten alittamiseksi. Toisaalta suurillakaan höyrykuormilla NO_x -päästöillä ei ole liikkumavaraa ylöspäin lähes ollenkaan, koska optimaalisilla suutinpaikolla todennäköisesti päästään niukasti alle tavoitellun päästörajan. Tällöinkin turpeen osutta tulee pyrkiä rajoittamaan, jotta pysyttäisiin alle päästörajoitusten. Ongelma todennäköisesti ilmenee suurilla höyrykuormilla, koska yleisesti turpeen osuus on korkeampi suuremmilla höyrykuormilla turpeen paremman lämpöarvon takia.

Normaalisti käytetään 2 tai 3 syöttötasoa, mutta tämä ei mielestäni ole mahdollinen vaihtelevien höyrykuormien takia. K3-kattila vaatisi neljä urean syöttötasoa NO_x -päästöjen vähentämiseksi, koska kattilan höyrykuormat vaihtelevat suuresti riippuen sellutehtaasta ja paperikoneista. Koska urean käytöllä saavutetuissa NO_x -päästöissä ei ole liikkumavaraa, tulisi syöttötasoja olla useita, jolloin saavutettaisiin optimaalisin suutintaso jokaiselle eri höyrykuormalle. Tällöin on toden-

näköisintä, että pystyttäisiin pysymään alle päästörajoitusten. Syöttötasot olisivat alle 40 kg/s höyrykuormalla 15 m, 40 - 50 kg/s höyrykuormalla 17,5 m, 50 - 60 kg/s höyrykuormalla 20 - 22,5 m ja yli 60 kg/s höyrykuormalla 26 m.

On myös mahdollista, että tarvittava reduktio saataisiin kolmellakin syöttötasolla. Tämä tulisi mahdolliseksi, jos alle 40 kg/s höyrykuorman lämpötilakäyrä saataisiin samantyylliseksi kuin esimerkiksi 40 - 50 kg/s höyrykuormalla, joka vaatisi ilmojen uudelleen suunnittelua. Teoriassa sekundääri- ja tertiääri-ilmojen osuuden nostolla lämpötilakäyrä voitaisiin saada halutuksi.

LÄHTEET

1. Voimalaitosalue 11.4.2013. Sisäinen dokumentti. Stora Enso Oyj.
2. Huhtinen, Markku – Kettunen, Arto – Nurminen, Pasi – Pakkanen, Heikki 2000. Höyrykattilatekniikka. Helsinki: Oy Edita Ab.
3. Huhtinen, Markku – Korhonen, Risto – Pimiä, Tuomo – Urpalainen, Samu 2013. Voimalaitostekniikka. Tampere: Suomen Yliopistopaino Oy.
4. KnowEnergy - Demo. Saatavissa: http://www.knowenergy.net/suomi/knowpap_system/user_interfaces/prod_environment/0_monipoltt_kattilat/ui.htm. Hakupäivä 5.3.2015.
5. Turve. Energiateollisuus. Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/energiahteet/turve>. Hakupäivä 12.3.2015.
6. Puupolttoaineiden laatuohje VTT-M-07608-13 – päivitys 2014. Bioenergia. Saatavissa: http://bioenergia.fi/Tietoa_puuenergiasta. Linkki: Puupolttoaineiden laatuohje - päivitys 2014. Hakupäivä 12.3.2015.
7. Alakangas, Eija 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Saatavissa: <http://www2.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>. Hakupäivä 12.3.2015.
8. NO_x emissions study – theory and experiences of selected fluidized bed boilers. 2011. Metso. Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/nox_emissions_study_theory_and_experiences_of_selected_fluidized_bed_boilers.pdf. Hakupäivä 15.11.2014.
9. Hellgren, Matti – Heikkinen, Lauri – Suomalainen, Lauri 1996. Energia ja ympäristö. Helsinki: Hakapaino Oy.
10. 936/2014. Valtioneuvoston asetus suurten polttolaitosten päästöjen rajoittamisesta. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140936>. Hakupäivä 25.2.2015.

11. Raportti K3-kattilan SNCR-testeistä 12.1. - 16.1.2015. Valmet Oyj.

LIITTEET

Liite 1 Lähtötietomuistio

Liite 2 ABB-trendikäyrät alle 40 kg/s kuormalla

Liite 3 ABB-trendikäyrät 40 - 50 kg/s kuormalla

Liite 4 ABB-trendikäyrät 50 - 60 kg/s kuormalla

Liite 5 ABB-trendikäyrät 60 - 70 kg/s kuormalla

Liite 6 ABB-trendikäyrät yli 70 kg/s kuormalla

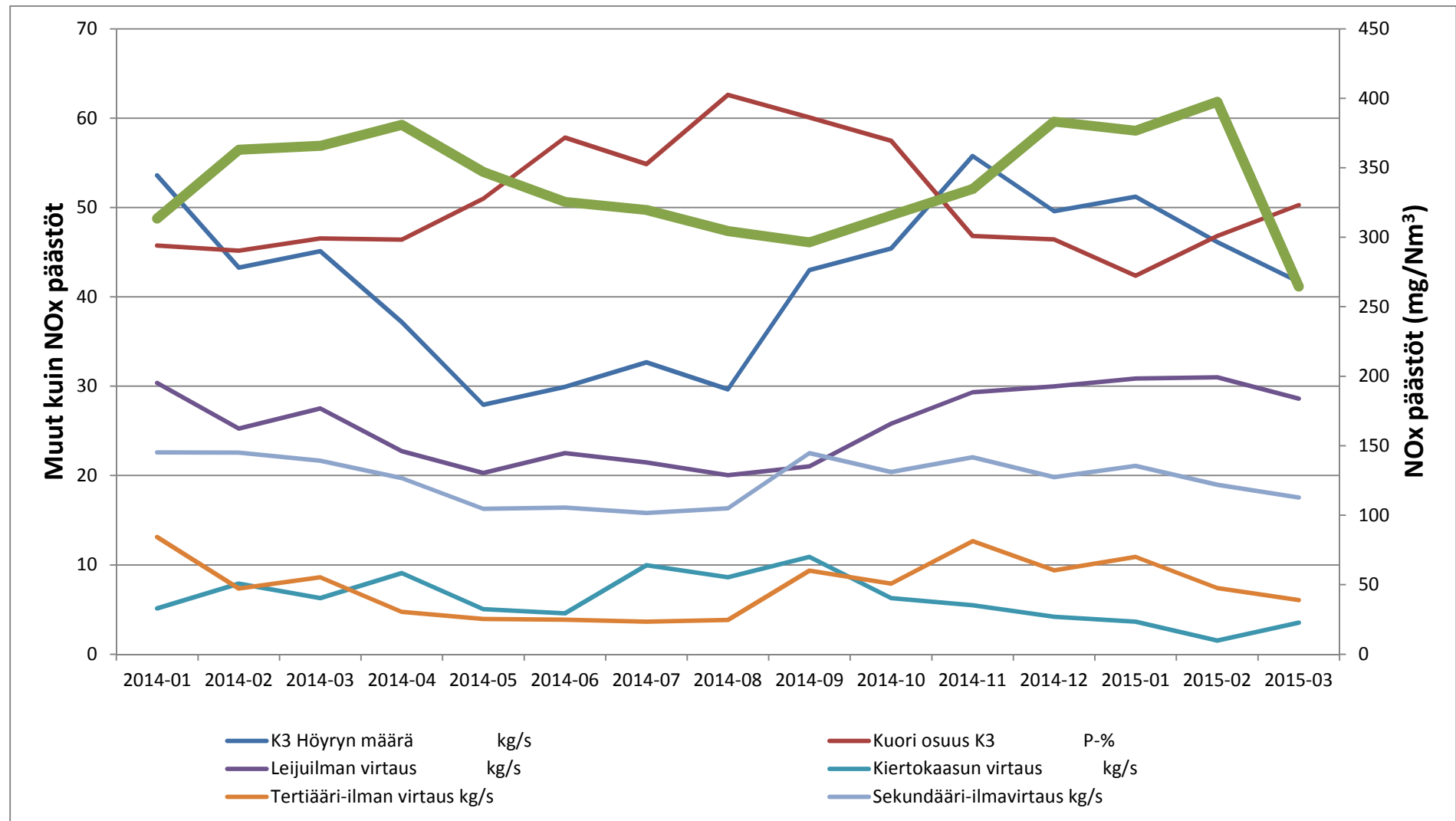
Liite 7 Lämpötilakäyrät eri höyrykuormilla

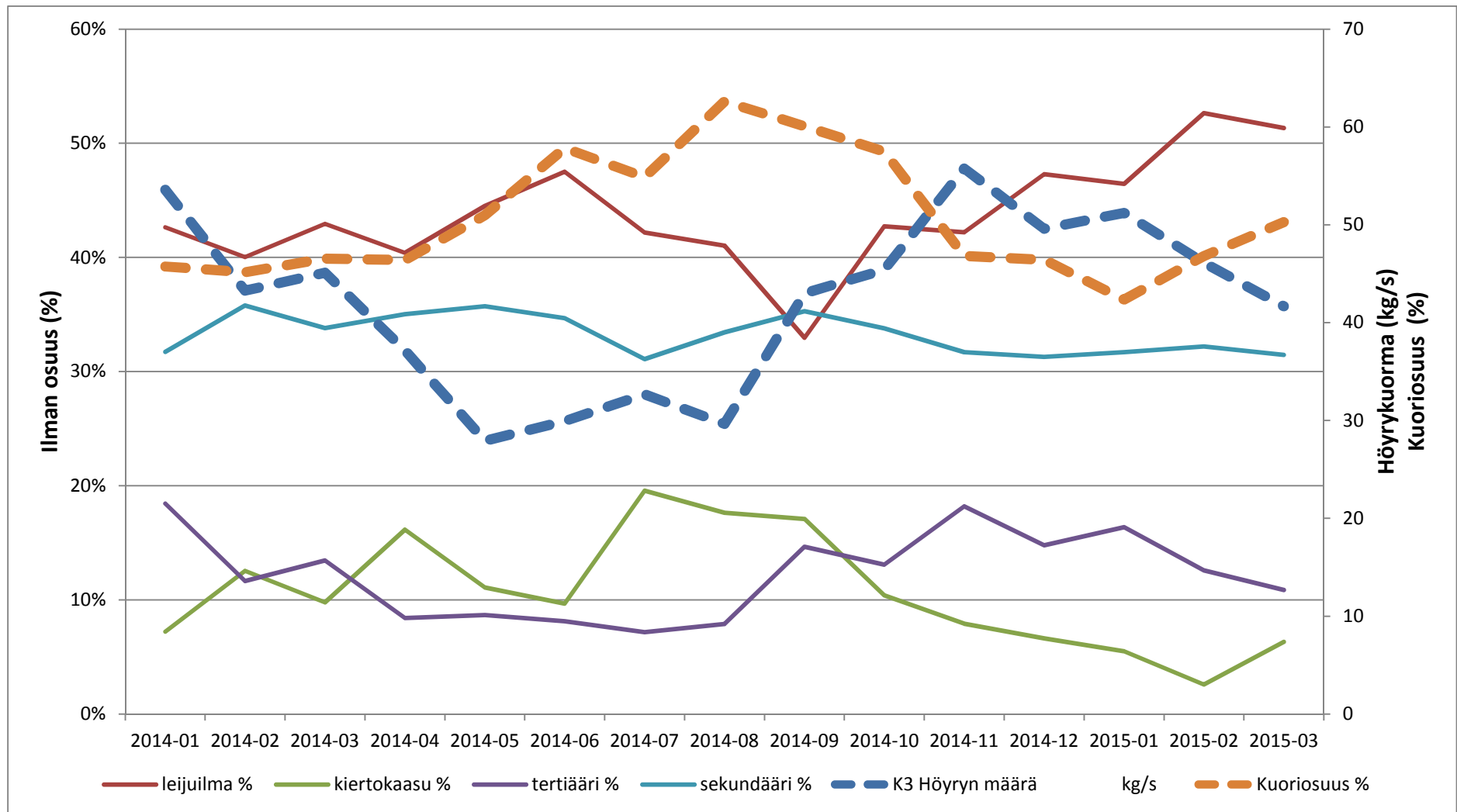
Liite 8 Urean koeajojen tulokset

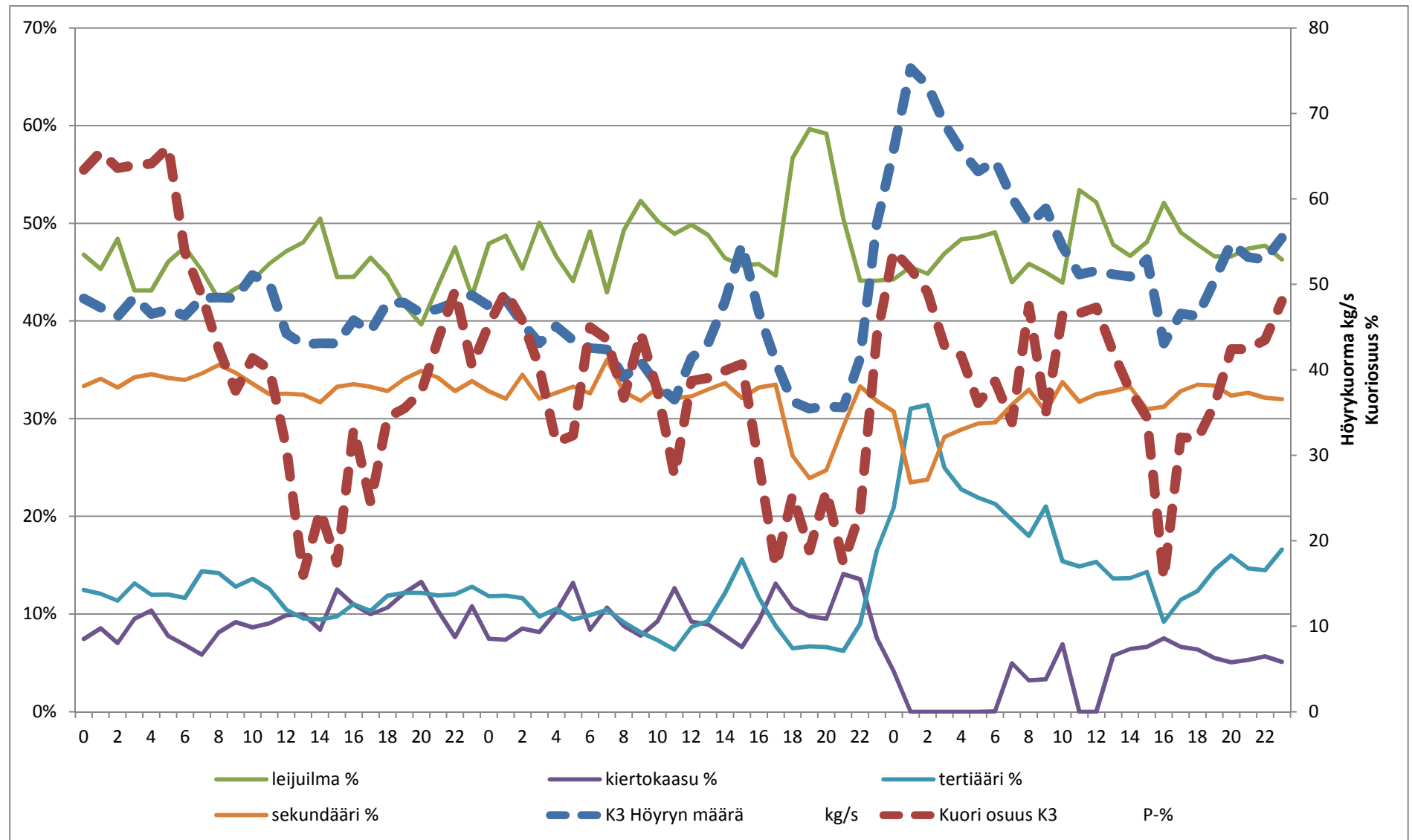
LÄHTÖTETOMUISTIO

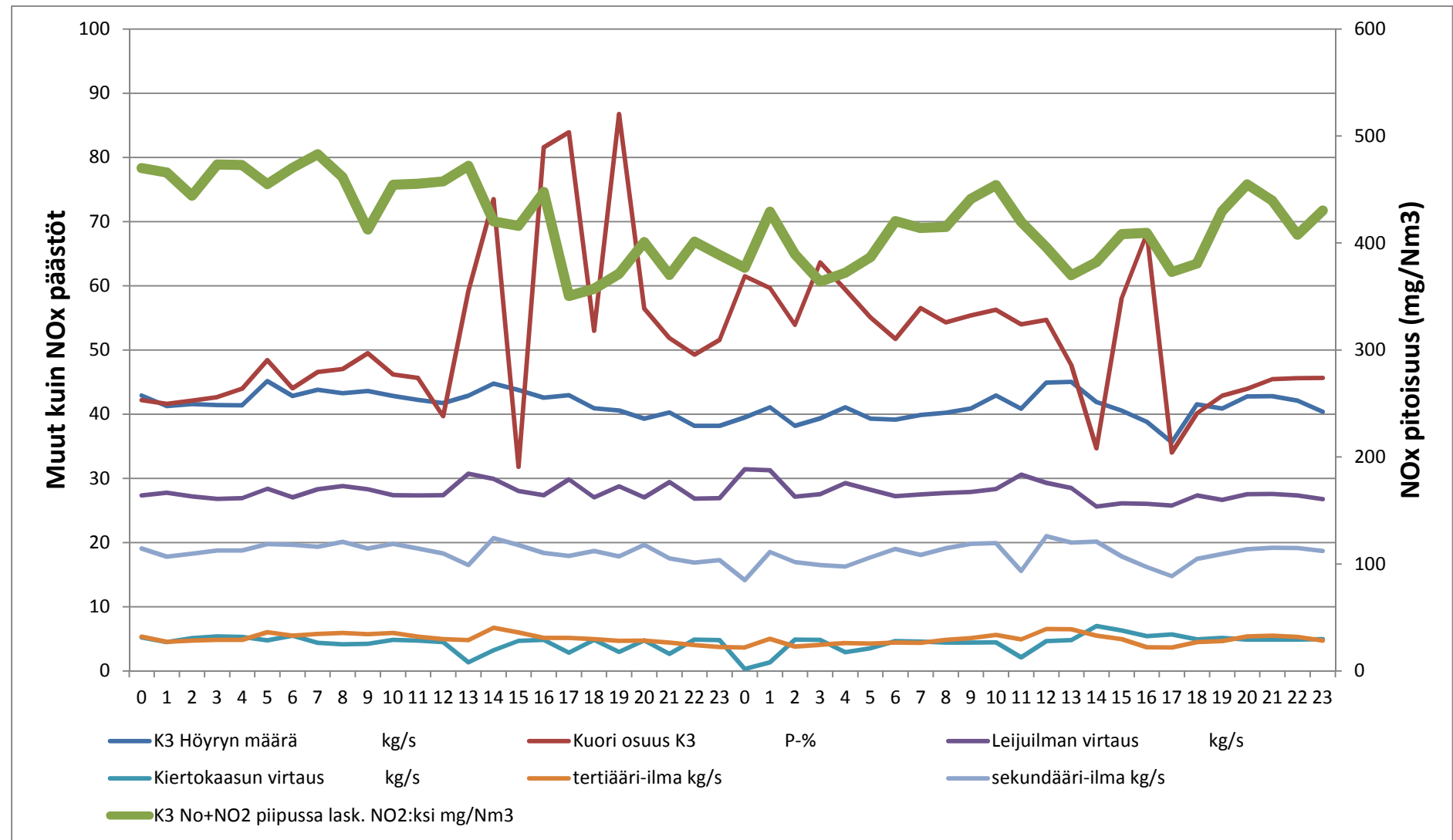
| | | |
|-------------|---|--|
| Työn tiedot | Tekijä ¹ Joni Koivu [REDACTED] | Tilaaja ² Stora Enso Oyj |
| | Tilaajan yhdyshenkilö ja yhteystiedot ³ Ilkka Laakso [REDACTED] | |
| | Työn nimi ⁴ Typpioksidipäästöjen vähentäminen K3-kattilassa | |
| | Työn kuvaus ⁵ -Mitataan tulipesän lämpöjä eri lämpökuormilla ja polttoainejakaumilla (mittauksia tehdään eri tasoissa tulipesää) -Suunnitellaan optimipaikka lämpötilojen perusteella SNCR-laitteistolle -Työ perustuu 1/2016 voimaan astuvaan päästädirektiiviin | |
| | Työn tavoitteet ⁶ Profiloida kattilan lämpöjä eri ajotavoilla ja saada selville optimipaikka urea suuttimille | |
| | Tavoiteaikataulu ⁷ | |
| | Päiväys ja allekirjoitukset ⁸ 4 / 11 / 2014 Tekijän allekirjoitus [REDACTED] Tilaajan allekirjoitus [REDACTED] | |

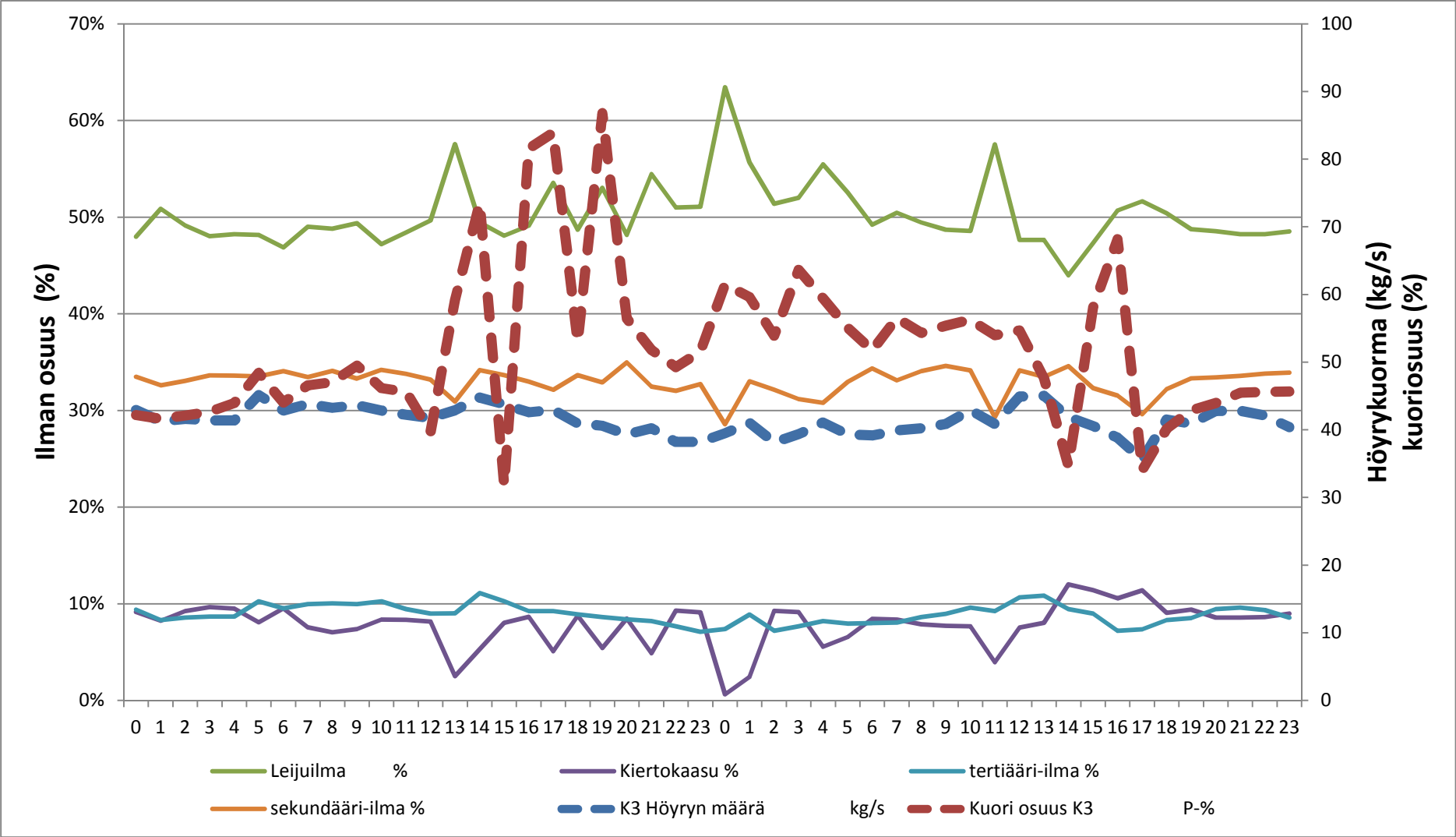
1. Tekijän nimi, puhelinnumero ja sähköpostiosoite.
2. Työn teettävän yrityksen virallinen nimi.
3. Sen henkilön nimi ja yhteystiedot, joka yrityksessä valvoo työn suoritusta.
4. Työn nimi voi olla tässä vaiheessa työnimi, jota myöhemmin tarkennetaan.
5. Työ kuvataan lyhyesti. Siinä esitetään muun muassa työn tausta, lähtötilanne ja työssä ratkaistavat ongelmat.
6. Esitetään lyhyesti ja selvästi työn tavoitteet.
7. Esitetään projektin tavoiteaikataulu. Silloin, kun työllä on välitavoitteita, myös ne merkitään aikatauluun. Tavoiteaikataulun ja oppilaitoksen yleisaikataulun perusteella tekijä laatii oman aikataulunsa.
8. Lähtötietomuuisto päivätään ja sen allekirjoittavat tekijä ja tilaajan yhdyshenkilö

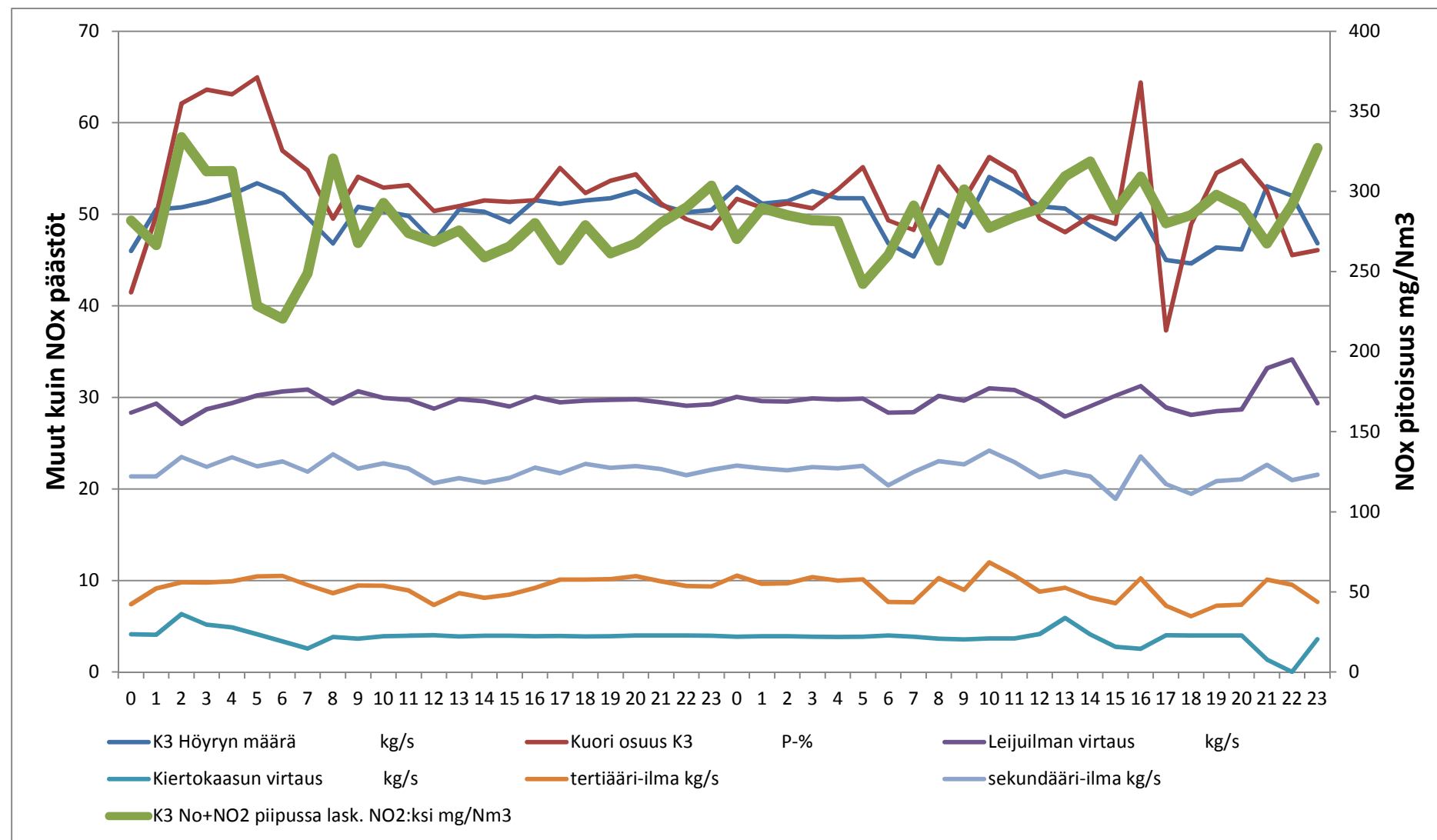


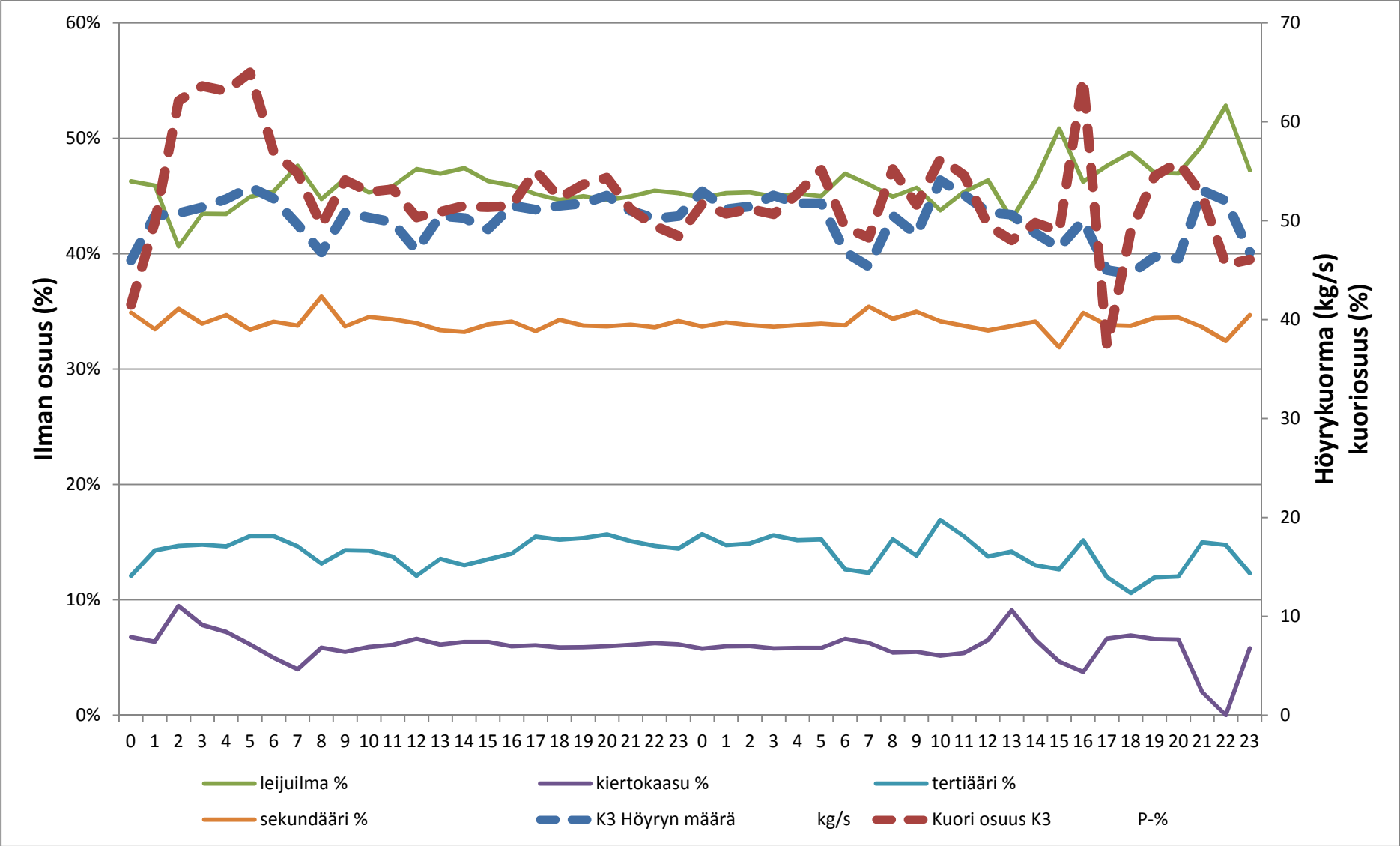


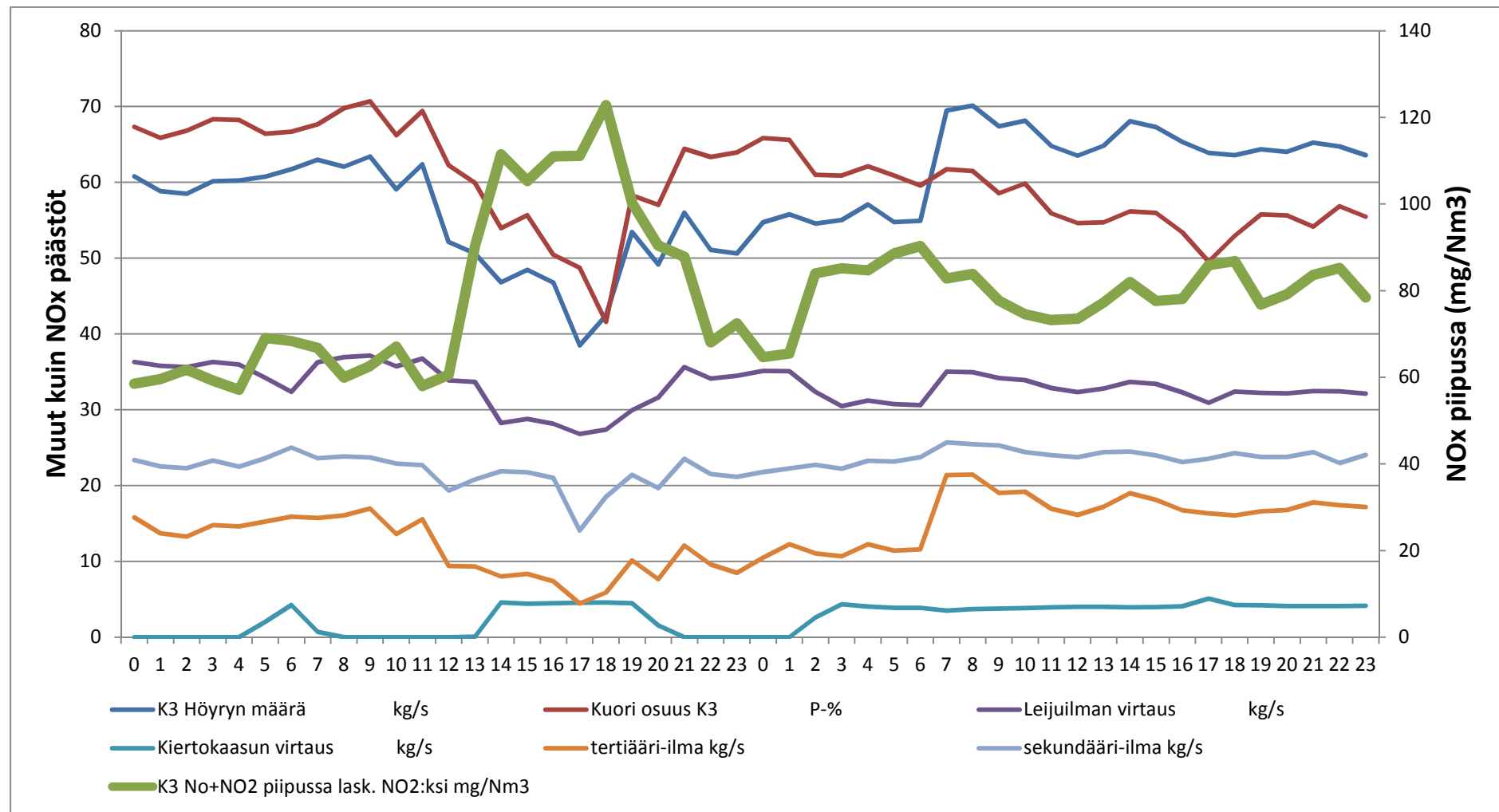


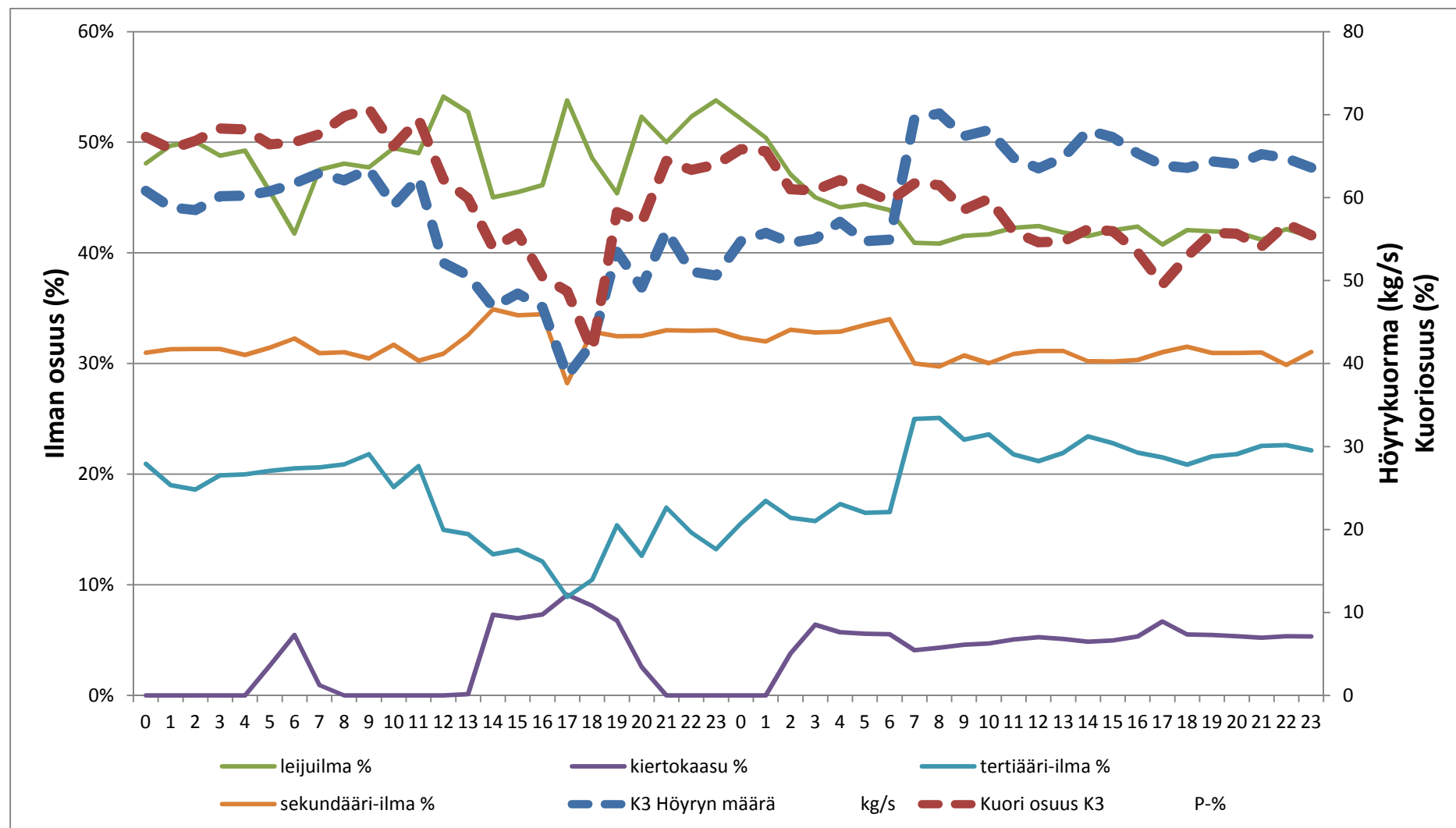


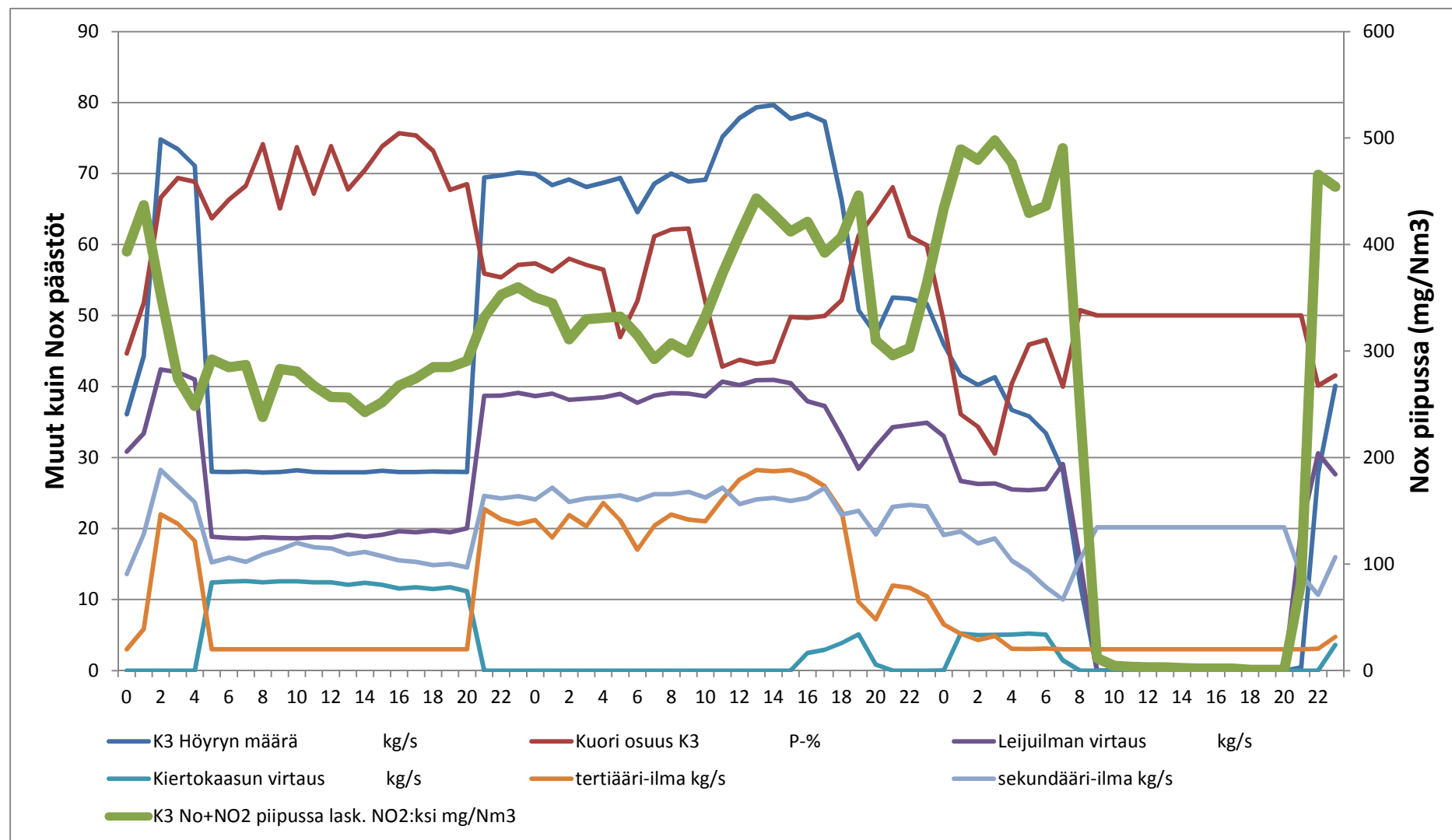


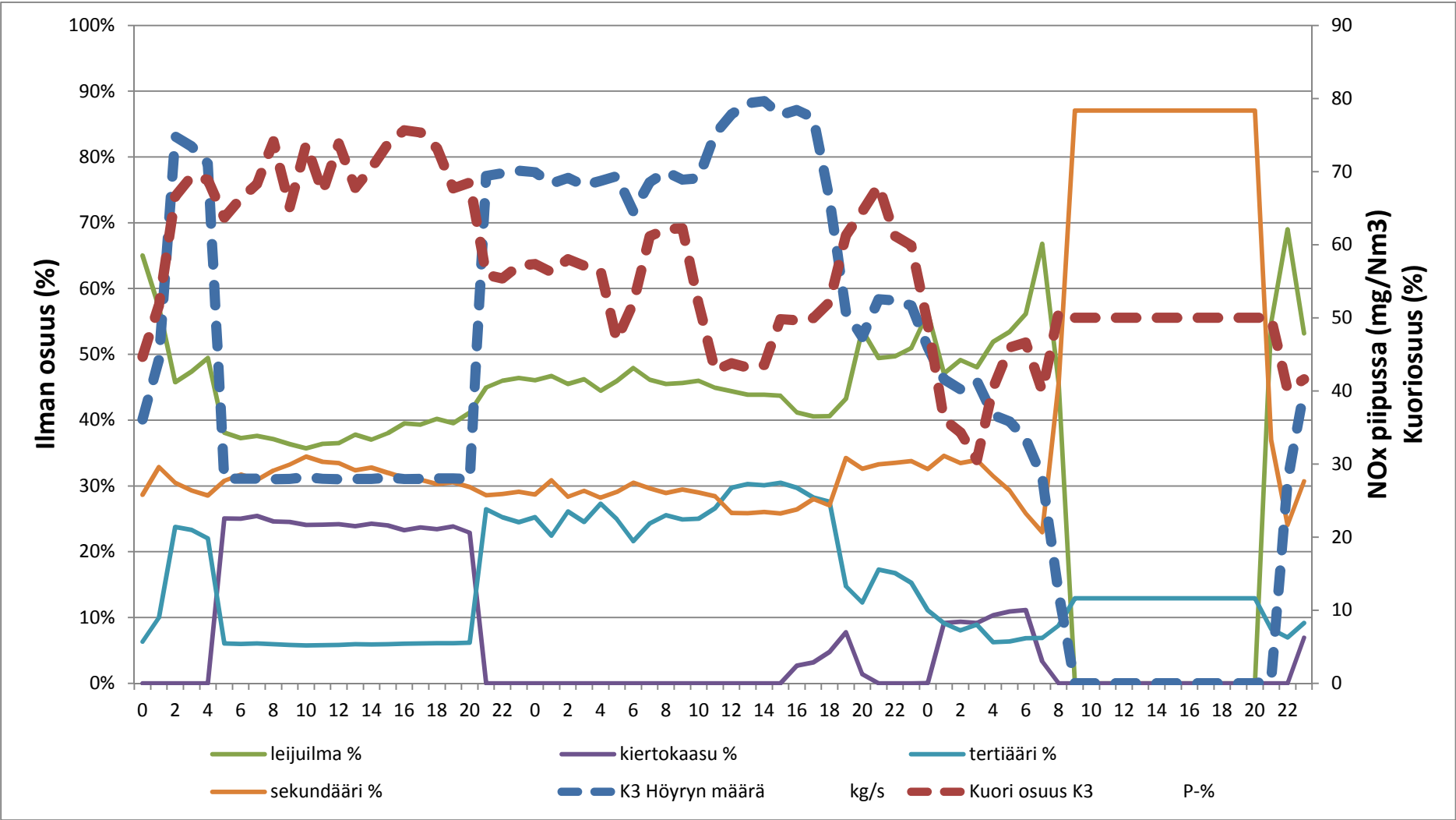


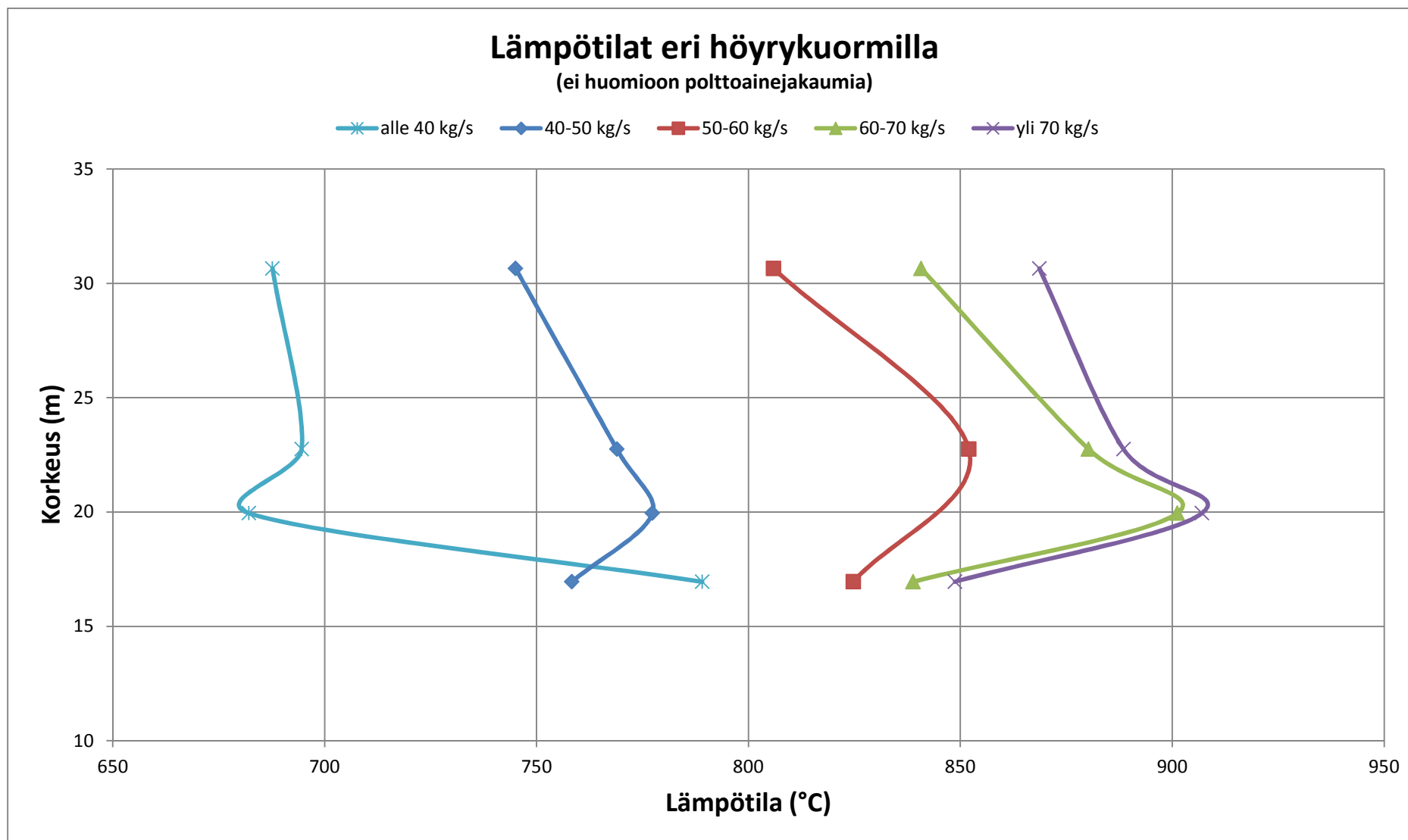












Raportti K3-kattilan SNCR-testeistä 12.1. - 16.1.2015. Valmet Oyj.

| Testipiste TP 16 15.1.2015 klo 17:50-18:17 | | Testipisteen keskiarvo |
|---|--|---------------------------|
| Laitosmittaukset | | |
| Tuorehöyryn virtaus | kg/s | 39.9 |
| NOx perustaso | mg/Nm ³ , 6% O ₂ kuiva | 463 |
| NOx piipussa | mg/Nm ³ , 6% O ₂ kuiva | 255 |
| CO piipussa | mg/Nm ³ , 6% O ₂ kuiva | 15 |
| 32.5% urean virtaus | kg/h | 213 |
| NOx reduktio | % | 45 |
| FTIR mittaukset | | |
| NH ₃ -slippi | mg/Nm ³ , 6% O ₂ kuiva | 9 |
| Tulipesän lämpötila | | |
| Nokan taso | °C | - |
| Tertiäänitaso | °C | 684 (korjattu: 718) |

Raportti K3-kattilan SNCR-testeistä 12.1. - 16.1.2015. Valmet Oyj.

| Testipiste TP 19 15.1.2015 klo 19:55-20:33 | | Testipisteen keskiarvo |
|---|--|---------------------------|
| Laitosmittaukset | | |
| Tuorehöyryn virtaus | kg/s | 44.7 |
| NOx perustaso | mg/Nm ³ , 6% O ₂ kuiva | 500 |
| NOx piipussa | mg/Nm ³ , 6% O ₂ kuiva | 209 |
| CO piipussa | mg/Nm ³ , 6% O ₂ kuiva | 27 |
| 32.5% urean virtaus | kg/h | 327 |
| NOx reduktio | % | 58 |
| FTIR mittaukset | | |
| NH ₃ -slippi | mg/Nm ³ , 6% O ₂ kuiva | 10 |
| Tulipesän lämpötila | | |
| Nokan taso | °C | - |
| Tertliäritaso | °C | 722 (korjattu: 758) |

Raportti K3-kattilan SNCR-testeistä 12.1. - 16.1.2015. Valmet Oyj.

| Testipiste TP 11 14.1.2015 klo 18:41-19:15 | | Testipisteen keskiarvo |
|---|--|---------------------------|
| Laitosmittaukset | | |
| Tuorehöyryn virtaus | kg/s | 58.3 |
| NOx perustaso | mg/Nm ³ , 6% O ₂ kuiva | 402 |
| NOx piipussa | mg/Nm ³ , 6% O ₂ kuiva | 215 |
| CO piipussa | mg/Nm ³ , 6% O ₂ kuiva | 273 |
| 32.5% urean virtaus | kg/h | 245 |
| NOx reduktio | % | 47 |
| FTIR mittaukset | | |
| NH ₃ -slippi | mg/Nm ³ , 6% O ₂ kuiva | 16 |
| Tulipesän lämpötila | | |
| Nokan taso | °C | - |
| Tertiääritaso | °C | 861 (korjattu: 904) |

Raportti K3-kattilan SNCR-testeistä 12.1. - 16.1.2015. Valmet Oyj.

| Testipiste TP 14 15.1.2015 klo 13:50-14:30 | | Testipisteen keskiarvo |
|---|--|---------------------------|
| Laitosmittaukset | | |
| Tuorehöyryn virtaus | kg/s | 79.2 |
| NOx perustaso | mg/Nm ³ , 6% O ₂ kuiva | 386 |
| NOx piipussa | mg/Nm ³ , 6% O ₂ kuiva | 257 |
| CO piipussa | mg/Nm ³ , 6% O ₂ kuiva | 480 |
| 32.5% urean virtaus | kg/h | 294 |
| NOx reduktio | % | 33 |
| FTIR mittaukset | | |
| NH ₃ -slippi | mg/Nm ³ , 6% O ₂ kuiva | 8 |
| Tulipesän lämpötila | | |
| Nokan taso | °C | - |
| Tertiääritaso | °C | - |